

ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS NAS PRIMEIRAS IDADES

HUGO FILIPE DOS SANTOS CAETANO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Doutor João Filipe Meneses Espinheira Rio

Professora Doutora Sandra da Conceição Barbosa Nunes

JANEIRO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha irmã...

*“Ninguém é tão pequeno que não possa ensinar,
nem tão grande que não possa aprender!”*

Esopo

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostava de agradecer à minha companheira, por todo o apoio e dedicação demonstrado ao longo deste período.

Gostaria também de agradecer o apoio dos meus pais, irmãs e cunhado, pela paciência demonstrada ao longo deste percurso académico.

Ao meu orientador João Rio um muito obrigado, pelos conhecimentos transmitidos, pelo apoio e disponibilidade demonstrada no desenvolver deste trabalho experimental.

À minha co-orientadora Sandra Nunes, pela disponibilidade sempre demonstrada.

Quero agradecer à minha colega Cristiana Regina, pelo companheirismo demonstrado neste processo.

Quero agradecer à Paula Silva e ao Cláudio Ferraz pelo apoio prestado no decorrer dos ensaios laboratoriais.

RESUMO

O trabalho desenvolvido ao longo desta tese de mestrado foi desenvolvido em coordenação com o projeto FCT PTDC/ECM/122446/2010 Betofibra - Betões de elevado desempenho reforçado com fibras em soluções inovadoras: conceção, caracterização e controlo de qualidade, a ser levado a cabo na Unidade de Investigação LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural do Departamento de Engenharia Civil da FEUP.

O principal objetivo deste estudo experimental passou por conceber, construir, testar e utilizar um molde instrumentado com capacidade para avaliar a evolução da temperatura, resistividade e ultrassons na hidratação do cimento em pastas, argamassas e betões, correntes e de elevado desempenho, durante as primeiras idades, ie, até às 48 horas. Nesse sentido, após um estudo prévio do estado da arte foi possível realizar um molde instrumentado com capacidade de registar a evolução da temperatura de forma contínua e automática, e que permitiu registar a evolução da resistividade e de ultrassons de forma discreta e indireta, através da ação de um operador mas mantendo provete em condições isolado e em condições estáveis de cura.

O processo de desenvolvimento do equipamento começou pela construção de um primeiro protótipo que mostrou capacidade de reproduzir já os resultados pretendidos. No entanto, devido ao uso de materiais e técnicas menos adequadas, como se veio a constatar, acabou por revelar uma acentuada degradação após os dois primeiros ensaios. Teve-se oportunidade de proceder à construção de um segundo protótipo de molde instrumentado, em que foram incorporadas as lições técnicas de utilização aprendidas entretanto.

Neste segundo molde eliminaram-se as limitações manifestadas pelo primeiro protótipo apresentando maior robustez e facilidade de montagem, utilização e desmontagem. Perante o sucesso aparente do segundo protótipo, foi decidido construir mais três moldes instrumentados equivalentes.

Com a disponibilidade de quatro moldes instrumentados equivalentes, foi aumentado o âmbito do trabalho de forma a incluir um número de estudos paramétricos, nomeadamente: relação água/cimento, quantidade de agregado do tipo areia, presença, tipo e concentração de fibras. Foi ainda realizado um estudo da evolução de cura de um betão auto-compactável de elevado desempenho, com fibras, do interesse do já mencionado projeto de investigação Betofibra.

Este documento apresenta o processo de desenvolvimento dos moldes instrumentados, assim como os resultados de um estudo de preliminar e dos estudos paramétricos. Com base nos resultados obtidos ao longo desta campanha experimental, constatou-se que os últimos quatro moldes instrumentados revelaram ser consistentes entre si e ter capacidade de permitir a realização de ensaios não destrutivos que se mostrou terem sensibilidade suficiente às diferenças introduzidas nos vários estudos paramétricos.

PALAVRAS-CHAVE: comportamento nas primeiras idades, ensaios não destrutivos, betões de elevado desempenho auto-compactáveis com fibras (HPFRC), molde instrumentado.

ABSTRACT

The work developed in this Master Thesis was done in coordination with FCT project PTDC/ECM/122446/2010 Betofibra, and carried out within LABEST, Laboratory for the Concrete Technology and Structural Behaviour research group at FEUP.

The main objective of this experimental study was to design, build and test a sensorized mold with capacity to measure temperature, resistivity and ultrasound wave velocity evolutions during early ages of cement-based materials (48 hours). An initial study of the state of art was followed by the design and construction of first prototype of the sensorized mold which had the capacity to measure in a continuous and automatic mode the temperature evolution. It also enabled the measurement of discrete electric resistivity and ultrasound wave velocity readings, while keeping the sample protected in a stable curing condition.

The process of developing the sensorized mold began with the design and construction of an initial prototype, which already had the capacity to produce the desired results. However, with the use of lesser quality materials and initial underdeveloped assembly and disassembly techniques during two initial experimental tests resulted in considerable degradation of the mold. Following this, a second prototype was designed, in which all the lessons learned were incorporated.

Having reduced or eliminated the limitations shown by first prototype, the second mold was also made to be easier to use, assemble and disassemble and as well as stronger and more durable. The relative success of this second design led to the construction of three other equivalent sensorized molds.

With access to four equivalent sensorized molds, the scope of the work was increased in order to include a number of parametric studies that could now be done at a rhythm of one per week: water/cement ratio, the quantity of sand, presence, type and fibre concentration. A final test of a fibre reinforced high performance self-compacting concrete was also carried out, relevant to the project Betofibra project.

This thesis presents the development design process of the sensorized molds, as well as the preliminary and parametric test results. The results obtained during the experimental campaign support the conclusion that the four second design sensorized molds showed consistency between them and the capacity to permit non-destructive test which in turn had enough sensitivity to the parametric variations included in the studies.

KEYWORDS: early ages behaviour, non-destructive tests, fibre reinforced high performance concrete (FRHPC), sensorized mold.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE GERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE QUADROS	XVII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2. FASES DE DESENVOLVIMENTO DA TESE.....	1
1.3. DESCRIÇÃO GERAL DOS ENSAIOS REALIZADOS	2
1.4. ESTRUTURA DA TESE	2
2. ESTADO DA ARTE.....	5
2.1. INTRODUÇÃO.....	5
2.2. COMPOSIÇÃO DO BETÃO	5
2.2.1. CIMENTO	6
2.2.2. AGREGADOS	6
2.2.3. ADIÇÕES.....	7
2.2.4. ADJUVANTES.....	7
2.2.5. ÁGUA.....	8
2.2.6. FIBRAS	8
2.3. PROPRIEDADES DO BETÃO.....	8
2.3.1. COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO	8
2.3.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A TEMPERATURA NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO	9
2.3.2.1. Temperatura de cura.....	10
2.3.2.2. Adjuvantes	11
2.3.2.3. Adições	12
2.4. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	13
2.4.1. MOLDES INSTRUMENTADOS	13
2.4.2. RESISTIVIDADE	13
2.4.2.1. Fatores que influenciam a resistividade elétrica do betão	15

2.4.2.2. Razão água/cimento	16
2.4.2.3. Tipo e concentração de agregados	16
2.4.2.4. Adições	16
2.4.2.5. Adjuvantes	16
2.4.2.6. Temperatura e Humidade	16
2.4.3. ULTRASSONS	17
2.4.3.1. Teoria da Propagação de Ondas	17
2.4.3.2. Equipamentos de Ultrassons.....	18
2.4.3.3. Esquemas de medição.....	18
2.4.3.4. Fatores que afetam a velocidade de impulso	19
2.5. ENSAIOS DESTRUTIVOS	24
2.5.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	24
2.5.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	24
2.6. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	25
2.6.1. ESPALHAMENTO	25
2.6.2. ENSAIO DE VICAT	26
3. DESENVOLVIMENTO DO MOLDE INSTRUMENTADO.....	27
3.1. INTRODUÇÃO.....	27
3.2. REQUISITOS DO MOLDE INSTRUMENTADO	27
3.2.1. TEMPERATURA	28
3.2.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA	29
3.2.3. ULTRASSONS	30
3.3. MOLDES DE ENSAIO CONCEBIDOS.....	32
4. PROTOCOLO DE ENSAIO	37
4.1. INTRODUÇÃO.....	37
4.2. PREPARAÇÃO DO MOLDE.....	37
4.3. PREPARAÇÃO DA AMASSADURA	39
4.4. FECHO DO MOLDE PARA INÍCIO DE ENSAIOS	40
4.5. MATERIAIS CONSTITUINTES DAS AMASSADURAS.....	41
4.5.1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS.....	42
4.6. PROVETES PRISMÁTICOS	45
4.7. TEMPERATURA	45
4.7.1. TEMPERATURA NA SALA DE PRODUÇÃO E DE ENSAIO	45

4.7.2. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DA PASTA OU ARGAMASSA NA PRODUÇÃO.....	46
4.7.3. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA NO MOLDE NAS PRIMEIRAS 48 HORAS.....	46
4.8. RESISTIVIDADE ELÉTRICA	47
4.8.1. ESTUDO DE SENSIBILIDADE	49
4.9. ULTRASSONS	50
4.10. SISTEMA EXPERIMENTAL	51
4.11. ENSAIO DE ESPALHAMENTO	52
4.12. ENSAIO DE VICAT	53
4.13. DESMOLDAGEM E ARMAZENAMENTO DE PROVETES	53
4.14. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA POR FLEXÃO E À COMPRESSÃO.....	54
4.15. CALENDARIÇÃO SEMANAL DOS TRABALHOS EXPERIMENTAIS	56
5. ESTUDO PRELIMINAR	57
5.1. INTRODUÇÃO.....	57
5.2. MISTURAS, PASTAS E ARGAMASSAS	57
5.2.1. ESPALHAMENTO	59
5.2.2. ANÁLISE DE RESISTIVIDADE AO SINAL	59
5.3. REPRODUTIBILIDADE DO MOLDE HC1.....	63
5.4. REPRODUTIBILIDADE DO MOLDE HC2.....	67
5.5. FIABILIDADE DOS MOLDES HC2A, HC2B E HC2C.....	70
6. ESTUDOS PARAMÉTRICOS	75
6.1. INTRODUÇÃO.....	75
6.2. MISTURAS, AMASSADURAS, PASTAS E ARGAMASSAS	76
6.3. RAZÃO ÁGUA-CIMENTO W/C	78
6.4. CONCENTRAÇÃO DE AREIA	85
6.5. CONCENTRAÇÃO DE FIBRAS	89
6.6. TIPO DE FIBRAS.....	93
6.7. COMPARAÇÃO COM ARGAMASSA PROJETO	97
7. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	103
7.1. CONCLUSÕES.....	103
7.2. LIÇÕES APRENDIDAS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	104
BIBLIOGRAFIA	107
ANEXOS.....	A1
ANEXO A – PROVETES CÚBICOS E PRISMÁTICOS	A2

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema da composição do betão, [1].	6
Figura 2.2 - Evolução do calor de hidratação do cimento no tempo (correspondência com os períodos do processo do mecanismo reacional) [6].	9
Figura 2.3 – Evolução da resistência à compressão para diferentes temperaturas de cura [7].	10
Figura 2.4 – Taxa de calor gerado para CEM I 42,5R [7].	11
Figura 2.5 – Evolução da taxa de calor gerado do cimento CEM I 42.5R com e sem SP [8].	11
Figura 2.6 – Evolução da taxa de calor gerado do CEM I 42.5R com e sem FC [8].	12
Figura 2.7 – Evolução da temperatura de HAC nas primeiras 24 horas [9].	13
Figura 2.8 – Princípio de funcionamento utilizando a técnica dos 4 elétrodos (Sonda de Wenner): a) em solos [14]; b) em superfície de betão [15].	14
Figura 2.9 – Esquema representativo da medição de resistividade elétrica utilizando o método dos 2 elétrodos [16].	15
Figura 2.10 – Diagrama esquemático do circuito de ensaio de ultrassons.	18
Figura 2.11 - Configurações de medição de velocidade de impulso. T: Transdutor transmissor; R: Transdutor Recetor [20, 21].	19
Figura 2.12 – Evolução da velocidade de propagação de ultrassons (UPV) durante 24 horas em função do índice de reação (Índice de Reacción) a 24 horas ($I_{r,24}$) [9].	20
Figura 2.13 – Efeito da adição de minerais nos ultrassons [10].	23
Figura 2.14 – Efeito de agregados finos e grossos nos ultrassons, de uma mesma pasta de cimento: (a) –ao longo de 5000 min; (b) – nos primeiros 1000 min [10].	23
Figura 2.15 – Área de espalhamento: (a) circular; (b) não circular.	25
Figura 3.1 – Localização do detetor térmico no molde de ensaio instrumentado.	28
Figura 3.2 – Detetor térmico RTD [8].	28
Figura 3.3 – Sistema de ensaio para medição de temperatura: (a) computador portátil; (b) Datataker DT 505; (c) fios de ligação do detetor térmico do molde ao Datataker DT 505.	29
Figura 3.4 – Provete cúbico com redes para medição de resistividade.	29
Figura 3.5 – Molde com redes metálicas para medição da resistividade: (a) redes encostadas e fixas às faces do molde; (b) redes embebidas na pasta ou argamassa.	30
Figura 3.6 – (a) Molde com tampa com orifícios para passagem da rede; (b) orifícios da tampa tapados com papel.	30
Figura 3.7 Exemplo de visualização do valor do tempo de percurso de uma onda no ecrã do aparelho ultrassónico TICO.	31
Figura 3.8 – Dimensões dos transdutores piezoelétricos.	31
Figura 3.9 – (a) Face com orifício; (b) faces opostas com orifícios alinhados; (c) encaixe dos transdutores nos orifícios do molde.	32

Figura 3.10 – Molde instrumentado HC1: (a) base; (b) base com detetor térmico; (c) peças delimitadoras; (d) faces do molde, (e) faces do molde com orifício; (f) peças fixadoras das faces; (g) tampa.....	32
Figura 3.11 – (a) Base com peças delimitadoras; (b) faces com orifícios com peças fixadoras; (c) e (d) molde pronto para dar a forma cúbica ao provete.	33
Figura 3.12 – Fuga da pasta ou argamassa pelas arestas do molde.....	34
Figura 3.13 – (a) Destacamento da fórmica; (b) molde sem tampa para medição da resistividade.....	34
Figura 3.14 – (a) Interior do molde com arestas siliconadas; (b) molde completo.	35
Figura 3.15 – Conjunto de moldes concebidos e utilizados neste trabalho experimental.	36
Figura 4.1 – Molde instrumentado: (a) base; (b) orifício para colocação do detetor térmico; (c) peças de delimitadoras; faces do molde: (d) com orifício circular e (e) com varões roscados; (f) tampa; (g) porca de orelhas; (h) parafuso.....	38
Figura 4.2 – (a) Dimensões da rede; (b) e (c) disposição da rede no molde.	39
Figura 4.3 – Equipamentos utilizados na preparação das amassaduras.	40
Figura 4.4 – Colocação da pasta no molde de ensaio.....	40
Figura 4.5 – (a) Acetato por cima da pasta; (b) Escora a separar e fixar as redes.	41
Figura 4.6 – (a) – Tampa do molde com orifícios para a passagem das redes; (b) molde montado.....	41
Figura 4.7 – Materiais constituintes das amassaduras.....	42
Figura 4.8 – Curva granulométrica da areia utilizada nas amassaduras.....	44
Figura 4.9 – Molde para a fabrico dos provetes prismáticos: (a) molde montado; (b) redes metálicas; (c) molde com pasta ou argamassa.....	45
Figura 4.10 – Equipamentos de medição de temperatura e humidade utilizados ao longo dos ensaios.	46
Figura 4.11 – Termómetro de infra-vermelhos.....	46
Figura 4.12 – Sistema de ensaio para medição de temperatura: (a) computador portátil; (b) Datataker DT 505; (c) fios de ligação do detetor térmico do molde ao Datataker DT 505.	47
Figura 4.13 – Forma da onda em corrente alternada [12].	48
Figura 4.14 – Equipamentos utilizados no ensaio de resistividade.	48
Figura 4.15 – (a) Representação esquemática [16] e (b) sistema de ensaio da medição da resistividade elétrica pelo método dos dois eléctrodos.	49
Figura 4.16 – Representação esquemática do ensaio de ultrassons(a) e uma fotografia do mesmo (b).	51
Figura 4.17 – Sistema experimental.	52
Figura 4.18 – Dimensões do: (a) mini-cone para pastas; (b) molde tronco-cónico para argamassas.....	52

Figura 4.19 – Procedimento do ensaio de espalhamento.	53
Figura 4.20 – Fases de desmoldagem do provete cúbico.	54
Figura 4.21 – Condições de armazenamento dos provetes.	54
Figura 4.22 – Dispositivo de carga para a determinação da resistência à flexão (distâncias em mm) [30].	55
Figura 4.23 – Provetes prismáticos ensaiados à tração indireta por flexão e à compressão. ...	56
Figura 5.1 – Resultados dos ensaios de espalhamento do estudo preliminar.	59
Figura 5.2 – Estudo do tipo de sinal na medição da resistividade elétrica.	60
Figura 5.3 - Estudo do valor de voltagem na medição da resistividade elétrica.	61
Figura 5.4 - Estudo do valor de frequência na medição da resistividade elétrica.	62
Figura 5.5 – Evolução da temperatura nas primeiras 48 h dos provetes A1 e A2.	63
Figura 5.6 – Instabilidade dos valores de temperatura do provete A1 nas primeiras 2 horas. ..	64
Figura 5.7 – Comparação entre temperatura via detetor térmico e termómetro infravermelhos no provete A1.	65
Figura 5.8 – Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes A1 e A2.	65
Figura 5.9 – Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons nas primeiras 48 horas dos provetes A1 e A2.	66
Figura 5.10 – Evolução da temperatura nas primeiras 48 h dos provetes B1, B2 e B3 e respetivo tempo de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.	67
Figura 5.11 - Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes B1, B2 e B3 e respetivo tempo de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.	68
Figura 5.12 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons nas primeiras 48 horas dos provetes B1, B2, B3 e respetivo tempo de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.	69
Figura 5.13 – Ensaio de Vicat da pasta que originou o provete B3.	70
Figura 5.14 - Evolução da temperatura nas primeiras 48 h dos provetes C1, C2, C3 e C4 e respetivo tempo de início de presa do provete C1 dado pelo ensaio de Vicat.	70
Figura 5.15 - Evolução da resistividade nas primeiras 48 h dos provetes C1, C2, C3 e C4 e respetivo tempo de início de presa do provete C1 dado pelo ensaio de Vicat.	71
Figura 5.16 - Evolução da resistividade elétrica ao longo de 28 dias dos provetes C1, C2, C3 e C4.	72
Figura 5.17 - Evolução da velocidade de propagação de ondas de ultrassons nas primeiras 48 horas dos provetes C1, C2, C3 e C4 e respetivo tempo de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.	73
Figura 5.18 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons ao longo de 28 dias dos provetes C1, C2, C3 e C4.	73
Figura 6.1 - Resultados dos ensaios de espalhamento em pastas, dos estudos paramétricos.	78

Figura 6.2 - Resultados dos ensaios de espalhamento em argamassas, dos estudos paramétricos.....	78
Figura 6.3 - Evolução da temperatura nas primeiras 48 h dos provetes G1 (w/c: 0.40), G2 (w/c: 0.60), G3 (w/c: 0.67) e G4 (w/c: 0.80) e respectivos inícios de presa dado pelo ensaio de Vicat.	79
Figura 6.4 - Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes G1 (w/c: 0.40), G2 (w/c: 0.60), G3 (w/c: 0.67) e G4 (w/c: 0.80) e respectivos tempos de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.	80
Figura 6.5 - Evolução da resistividade elétrica ao longo de 28 dias dos provetes G1 (w/c: 0.40), G2 (w/c: 0.60), G3 (w/c: 0.67) e G4 (w/c: 0.80).	81
Figura 6.6 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons nas primeiras 48 h dos provetes G1 (w/c: 0.40), G2 (w/c: 0.60), G3 (w/c: 0.67) e G4 (w/c: 0.80) e respectivos tempos de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.....	82
Figura 6.7 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons ao longo de 28 dias dos provetes G1 (w/c: 0.40), G2 (w/c: 0.60), G3 (w/c: 0.67) e G4 (w/c: 0.80).	83
Figura 6.8 – Correlação entre resistividade elétrica com a resistência à compressão, aos 28 dias para o estudo paramétrico da razão água/cimento.	84
Figura 6.9 - Evolução da temperatura nas primeiras 48 h dos provetes E1 (Ref.), E2 (40% Ar) e E3 (50% Ar) e respectivos tempos de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.	85
Figura 6.10 - Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes E1 (Ref.), E2 (40% Ar) e E3 (50% Ar) e respectivos tempos de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.	86
Figura 6.11 - Evolução da resistividade elétrica ao longo de 28 dias dos provetes E1 (Ref.), E2 (40% Ar) e E3 (50% Ar).....	87
Figura 6.12 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons nas primeiras 48 horas dos provetes E1 (Ref.), E2 (40% Ar) e E3 (50% Ar) e respetivo tempo de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.	88
Figura 6.13 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons ao longo de 28 dias dos provetes E1 (Ref.), E2 (40% Ar) e E3 (50% Ar).	89
Figura 6.14 – Variação de Temperatura (ΔT) nas primeiras 48 h dos provetes E2 (40% Ar), F2 (40% Ar + 0.5% Fi 6), F3 (40% Ar + 1.5% Fi 6) e E4 (40% Ar + 3% Fi 6).	90
Figura 6.15 - Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes E2 (40% Ar), F2 (40% Ar + 0.5% Fi 6), F3 (40% Ar + 1.5% Fi 6) e E4 (40% Ar + 3% Fi 6).....	91
Figura 6.16 – Evolução da resistividade elétrica ao longo de 28 dias dos provetes E2 (40% Ar), F2 (40% Ar + 0.5% Fi 6), F3 (40% Ar + 1.5% Fi 6) e E4 (40% Ar + 3% Fi 6).....	92
Figura 6.17 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons nas primeiras 48 horas dos provetes E2 (40% Ar), F2 (40% Ar + 0.5% Fi 6), F3 (40% Ar + 1.5% Fi 6) e E4 (40% Ar + 3% Fi 6).	92
Figura 6.18 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons ao longo de 28 dias dos provetes E2 (40% Ar), F2 (40% Ar + 0.5% Fi 6), F3 (40% Ar + 1.5% Fi 6) e E4 (40% Ar + 3% Fi 6).	93

Figura 6.19 - Variação de Temperatura (ΔT) nas primeiras 48 h dos provetes E2 (40% Ar), E4 (40% Ar + 3% Fi 6) e F1 (40% Ar + 3% Fi 9).	94
Figura 6.20 - Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes E2 (40% Ar), E4 (40% Ar + 3% Fi 6) e F1 (40% Ar + 3% Fi 9).	95
Figura 6.21 - Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes E2 (40% Ar), E4 (40% Ar + 3% Fi 6) e F1 (40% Ar + 3% Fi 9).	96
Figura 6.22 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons nas primeiras 48 horas dos provetes E2 (40% Ar), E4 (40% Ar + 3% Fi 6) e F1 (40% Ar + 3% Fi 9).	96
Figura 6.23 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons ao longo de 28 dias dos provetes E2 (40% Ar), E4 (40% Ar + 3% Fi 6) e F1 (40% Ar + 3% Fi 9).	97
Figura 6.24 - Diferença de Temperatura (ΔT) nas primeiras 48 h dos provetes F4 (Argamassa Projeto), E4 (40% Ar + 3% Fi 6) e F1 (40% Ar + 3% Fi 9).	98
Figura 6.25 - Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes E4 (40% Ar + 3% Fi 6), F1 (40% Ar + 3% Fi 9) e F4 (Argamassa Projeto).	99
Figura 6.26 - Evolução da resistividade ao longo de 28 dias dos provetes E4 (40% Ar + 3% Fi 6), F1 (40% Ar + 3% Fi 9) e F4 (Argamassa Projeto).	100
Figura 6.27 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons nas primeiras 48 horas dos provetes E4 (40% Ar + 3% Fi 6), F1 (40% Ar + 3% Fi 9) e F4 (Argamassa Projeto).	100
Figura 6.28 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons ao longo de 28 dias dos provetes E4 (40% Ar + 3% Fi 6), F1 (40% Ar + 3% Fi 9) e F4 (Argamassa Projeto).	101

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Ordem de grandeza das proporções dos constituintes no betão, [1].	6
Quadro 2.2 – Correções para a velocidade de impulso devido a mudanças de temperatura [20].	21
Quadro 2.3 – Incidência das dimensões da amostra sobre a transmissão dos impulsos ultrassônicos [19].	22
Quadro 2.4 – Composições e proporções utilizadas no estudo experimental [10].	22
Quadro 4.1 – Características do cimento CEM I 42,5R fornecido pela SECIL [25].	43
Quadro 4.2 – Características do filer calcário fornecido pela Comital [25].	43
Quadro 4.3 – Características das fibras de aço utilizadas [25].	44
Quadro 4.4 – Características do superplastificante fornecido pela Sika [28].	44
Quadro 4.5 – Estudo do tipo de sinal.	49
Quadro 4.6 – Estudo de voltagem.	49
Quadro 4.7 – Estudo da frequência.	50
Quadro 4.8 - Calendarização Semanal dos trabalhos experimentais.	56
Quadro 5.1 – Constituição da mistura M1.	58
Quadro 5.2 – Amassaduras e provetes produzidas com a mistura M1.	58
Quadro 5.3 – Valores característicos das curvas de temperatura dos provetes A1 e A2.	63
Quadro 5.4 - Valores característicos das curvas de temperatura dos provetes B1, B2 e B3.	67
Quadro 5.5 - Valores característicos das curvas de temperatura dos provetes C1, C2, C3 e C4.	71
Quadro 5.6 – Resistividade elétrica e velocidade de propagação de ultrassons.	71
Quadro 6.1 – Constituição das misturas utilizadas no estudo paramétrico.	76
Quadro 6.2 – Amassaduras e provetes fabricados com diferentes misturas, data e hora de fabrico.	77
Quadro 6.3 – Resistividade elétrica e velocidade de propagação de ultrassons.	79
Quadro 6.4 - Valores característicos das curvas de temperatura dos provetes G1, G2, G3 e G4.	80
Quadro 6.5 - Valores de resistividade elétrica, velocidade ultrassons e resistência à compressão e tração.	84
Quadro 6.6 - Valores característicos das curvas de temperatura dos provetes E1, E2 e E3.	85
Quadro 6.7 – Resistividade elétrica e velocidade de propagação de ultrassons.	86
Quadro 6.8 – Valores de temperatura máxima e respetiva idade.	90
Quadro 6.9 – Resistividade elétrica e velocidade de propagação de ultrassons.	90

Quadro 6.10 - Valores de temperatura máxima e respetiva idade.	94
Quadro 6.11 – Resistividade elétrica e velocidade de propagação de ultrassons.	94
Quadro 6.12 - Valores de temperatura máxima e respetiva idade.	98
Quadro 6.13 – Resistividade elétrica e velocidade de propagação de ultrassons.	99

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O conhecimento do comportamento do betão nas primeiras idades é de elevada importância no âmbito da engenharia civil, uma vez que grandes alterações químicas e físicas que surjam nesta fase terão enormes repercussões na estrutura cimentícia das argamassas e dos betões a longo prazo. Sendo assim, a resistência das estruturas de betão podem ser fortemente condicionadas e comprometidas se não houver um domínio das diferentes fases de desenvolvimento de hidratação do cimento e cura do betão.

Havendo um conhecimento acerca dos parâmetros que afetam a evolução da hidratação da pasta de cimento nas primeiras 48 horas é possível avaliar em tempo útil, a qualidade do betão que está a ser produzido e aplicado em obra. Uma possibilidade é a de conseguir prever de forma indireta através de ensaios não destrutivos as propriedades do material.

Esta tese apresenta o trabalho de conceção, desenvolvimento, construção e utilização de moldes instrumentados que permitem a realização de ensaios do tipo temperatura, resistividade elétrica e velocidade de ondas de ultrassons em provetes de materiais à base de cimento.

1.2. FASES DE DESENVOLVIMENTO DA TESE

No desenvolvimento da presente tese podemos distinguir quatro etapas. Na primeira etapa realizou-se um levantamento do estado da arte sobre ensaios não destrutivos para a caracterização de betões de elevado desempenho nas primeiras idades, permitindo traçar linhas orientativas para o desenvolvimento do molde instrumentado, que serviram de base de comparação com os resultados obtidos neste estudo experimental.

A segunda etapa passou pela conceção de um molde instrumentado com capacidade para avaliar a evolução da temperatura, resistividade e ultrassons na hidratação do cimento em pastas, argamassas e betões, correntes e de elevado desempenho, nas primeiras idades. Com a construção de um primeiro protótipo surgiram algumas limitações e houve necessidade de construir um segundo. Neste segundo molde eliminaram-se as limitações manifestadas pelo primeiro protótipo e perante o seu sucesso reproduziram-se mais três moldes instrumentados equivalentes.

Com o recurso a quatro moldes instrumentados, numa terceira fase, procedeu-se a um estudo paramétrico, nomeadamente: relação água/cimento, concentração de areia, presença, tipo e

concentração de fibras. Estudou-se ainda, um betão auto-compactável de elevado desempenho, com fibras, desenvolvido no âmbito do projeto de investigação Betofibra.

Por fim, procedeu-se à comparação dos resultados obtidos nestes ensaios com os resultados apresentados por outros investigadores sobre a mesma temática.

1.3. DESCRIÇÃO GERAL DOS ENSAIOS REALIZADOS

No decorrer dos ensaios experimentais foram efetuados dois tipos de ensaios: ensaios não destrutivos e ensaios destrutivos.

Dentro da gama dos ensaios não destrutivos encontram-se os ensaios de resistividade elétrica, ensaios de ultrassons e recolha de dados da evolução da temperatura. Estes ensaios foram realizados em provetes cúbicos com 100 mm de aresta. Os provetes foram ensaiados em condições controladas quando ainda dentro dos moldes instrumentados, durante as primeiras 48 horas, tendo os ensaios de resistividade elétrica e de ultrassons continuado até aos 28 dias de forma a avaliar a evolução do material.

Fazem parte da gama dos ensaios destrutivos, o ensaio de resistência à compressão e ensaio indireto de resistência à tração por flexão. Estes ensaios foram realizados com provetes prismáticos com 40 mm de largura, 40 mm de altura e 160 mm de comprimento aos 28 dias de idade.

Apesar de não se enquadrar de forma direta dentro destas duas gamas de ensaios, foram realizados ensaios de Vicat e ensaios de espalhamento para as diferentes misturas estudadas

Com o conjunto de resultados obtidos procuraram-se algumas das possíveis correlações, cujos resultados são apresentados.

1.4. ESTRUTURA DA TESE

A presente tese é constituída por 7 capítulos e 1 anexo, apresentando-se de seguida uma breve descrição dos mesmos.

No presente capítulo é feita uma introdução ao trabalho desenvolvido, onde são apresentadas as considerações gerais sobre o mesmo, indicando as principais fases de desenvolvimento da tese e também são descritos os vários ensaios realizados.

No segundo capítulo apresenta-se o estado da arte e contexto teórico-prático, fazendo-se referência a estudos já realizados sobre a evolução da hidratação em betões de elevado desempenho nas primeiras idades.

No terceiro capítulo apresenta-se o molde instrumentado desenvolvido para a realização dos ensaios, e os requisitos que este necessitava de respeitar, para que fosse possível a recolha de resultados da evolução da temperatura, resistividade e ultrassons.

No quarto capítulo descrevem-se os protocolos da preparação do molde para os provetes cúbicos e para os provetes prismáticos dos vários ensaios. O procedimento utilizado na preparação da amassadura, o método para a realização de ensaios de temperatura, resistividade, ultrassons, espalhamento, Vicat, resistência à tração indireta por flexão e resistência à compressão.

No quinto capítulo apresentam-se os resultados do estudo preliminar que foi realizado para avaliar a reprodutibilidade e fiabilidade dos moldes instrumentados desenvolvidos.

No sexto capítulo apresentam-se os resultados obtidos no estudo paramétrico, nomeadamente: razão água – cimento, concentração do agregado areia, tipo e concentração de fibras. São ainda apresentados os resultados das primeiras 48 horas de um betão auto-compactável de elevado desempenho reforçado com fibras, desenvolvido no âmbito do projeto Betofibra.

Por último, no sétimo capítulo, apresentam-se as conclusões deste trabalho e apresentam-se algumas propostas para desenvolvimentos futuros.

Nos anexos apresenta-se um conjunto de dados que completam a informação apresentada nos outros capítulos.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

Durante as primeiras idades o betão passa de um estado praticamente líquido para um estado sólido viscoelástico, sendo este um período de contínuas e profundas alterações ao nível das propriedades físicas deste material. O conjunto de complexas reações químicas que ocorrem quando a água entra em contacto com o cimento é responsável pelo desenvolvimento da microestrutura resistente do betão, e é denominado, de uma forma simples, por hidratação.

Neste capítulo será feita uma abordagem teórica sobre os temas que serão discutidos na tese e que são necessários para explicar alguns fenómenos que decorreram ao longo deste estudo experimental. Desta forma, falar-se-á sobre a composição do betão e os fatores que influenciam a sua hidratação, métodos não destrutivos usados seu estado fresco e endurecido, para estudar a evolução da hidratação do cimento nas primeiras 48 horas e ensaios destrutivos realizados aos 28 dias para determinação da sua resistência à compressão e à tração.

2.2. COMPOSIÇÃO DO BETÃO

O betão pode ser considerado como um material composto basicamente pela mistura de cimento, agregado miúdo e graúdo, água e eventualmente adições ou aditivos químicos, composto e adensado de forma a não ter quantidade de ar acima daquela incorporada intencionalmente. Na Figura 2.1 é possível realizar uma representação esquemática da composição do betão.

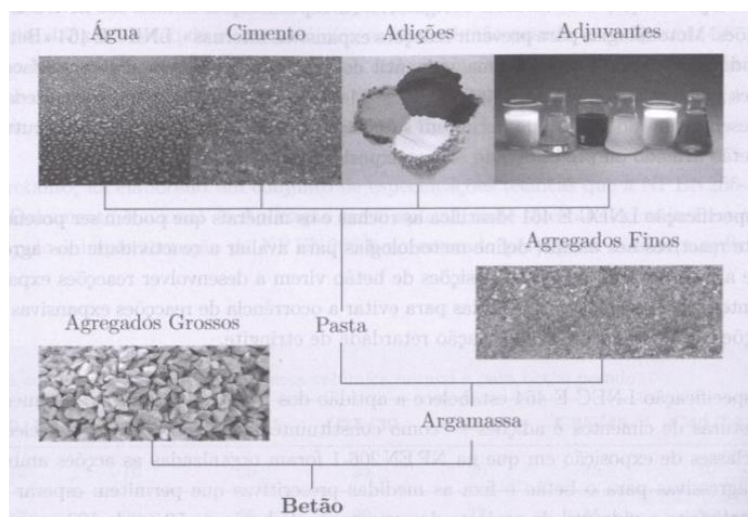


Figura 2.1 – Esquema da composição do betão, [1].

No Quadro 2.1 apresentam-se os intervalos mais comuns dos teores, em volume e em massa, dos principais constituintes do betão.

Quadro 2.1 – Ordem de grandeza das proporções dos constituintes no betão, [1].

Constituinte	Ligante	Agregado	Água	Ar
Volume	7%-14%	60%-78%	14%-22%	1%-6%
Massa	9%-18%	63%-85%	5%-9%	-

2.2.1. CIMENTO

Um ligante é um produto que ganha presa e endurece, podendo aglomerar outros materiais, tais como agregado grosso e areia. O cimento é um tipo de ligante hidráulico, que quando misturado com água e adjuvantes constitui a pasta do betão, que ganha presa e endurece por reações e processos de hidratação [1, 2].

Em betões de elevado desempenho são necessárias geralmente maiores quantidades de cimento, normalmente superiores a 400 kg/m³. Está também comprovado que quantidades muito grandes de cimento não conduzem a ganhos de resistência substanciais. Teixeira. et al [3] referem que na maioria dos casos estudados, a gama de consumo de cimentos está entre os 400 e os 500 kg/m³, um valor razoável andar próximo dos 450 kg/m³.

2.2.2. AGREGADOS

O agregado é considerado como todo o material granular adequado para utilização no betão, podendo este ser de origem natural (areias) ou obtido por britagem de materiais naturais (britas, areias britadas).

Os agregados podem ser naturais, artificiais, ou reciclados de materiais previamente usados na construção. Martins et al [4], apresentam três tipos de agregados, classificando-os quanto à

massa volúmica: como agregados leves, quando a massa volúmica é menor que 2000 kg/m^3 ; agregados normais, quando a massa volúmica está entre 2000 a 3000 kg/m^3 e agregados pesados, se esta for superior a 3000 kg/m^3 . Em geral, os agregados mais utilizados são as areias.

Vieira [1] refere que as principais funções dos agregados no betão podem sintetizar-se nos seguintes pontos: servir de enchimento, proporcionar resistência e durabilidade e reduzir alterações de volume devido ao processo de hidratação e secagem. Estes podem ser considerados o esqueleto do betão e condicionando a sua qualidade. As características minerais dos agregados afetam as propriedades físicas do betão no estado endurecido, enquanto as características geométricas influenciam principalmente o comportamento do betão no estado fresco.

2.2.3. ADIÇÕES

As adições mais utilizadas no fabrico do betão são: cinzas volantes, filer calcário, escórias de alto-forno, sílica de fumo e metacaulino, sendo que neste trabalho experimental utilizaram-se apenas o filer calcário e a sílica de fumo.

O filer calcário tem essencialmente a função de aumentar a compacidade da pasta, diminuindo a porosidade e, conseqüentemente, possibilitar a manutenção da resistência com menos clínquer, o que permite a diminuição do custo do ligante [1]. A sílica de fumo provém de resíduos ou subprodutos industriais. A sua eficiência depende da sua pozolanicidade, que consiste na capacidade da sílica ou dos aluminos-silicatos reativos das adições reagirem com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, formando quantidades adicionais de silicatos de cálcio hidratados. Esta reação designa-se por reação pozolânica, e tem três efeitos no betão: primeiro, a reação é lenta, como tal, a libertação de calor e o desenvolvimento da resistência são lentos; segundo, a reação é consumidora de hidróxido de cálcio, o que é positivo para a durabilidade em meios ácidos e onde possa ocorrer lixiviação; terceiro, a porosidade é diminuída, visto que os produtos da reação pozolânica preenchem os espaços vazios, melhorando, assim, a resistência e a estanqueidade do material.

2.2.4. ADJUVANTES

Martins et al [5] define adjuvante como sendo uma substância utilizada em percentagens inferiores a 5% da massa de cimento, que é adicionada durante a amassadura, aos componentes normais das argamassas e betões, com o fim de modificar certas propriedades desse material, quer no estado fresco, quer no estado endurecido e ainda no momento de passagem de um estado a outro. Esta definição não engloba as substâncias minerais moídas que se adicionam ao betão, como escórias, pozolanas, etc., que são adicionadas em proporções muito maiores.

Vieira [1] refere que os adjuvantes redutores de água, permitem, sem afetar a consistência, reduzir o teor de água de um dado betão, ou então, sem modificar a dosagem de água, aumentar a fluidez do betão ou, ainda, produzir os dois efeitos simultaneamente. Nos redutores de água distinguem-se os superplastificantes pela forte capacidade de redução de água, relativamente aos plastificantes.

2.2.5. ÁGUA

A quantidade de água na composição do betão é de grande importância para o seu comportamento, designadamente para a sua resistência e durabilidade. Vieira [1] refere que o cimento necessita de 23% do seu peso em água para se hidratar totalmente, no entanto, nem todo o cimento é hidratado e, por outro lado, são usados teores de água mais elevados para se poder produzir e aplicar o betão em condições físicas e economicamente aceitáveis. Assim, a água remanescente e evaporável contribuirá para a formação de uma rede de poros no interior do betão, afetando não só a sua resistência, mas também a sua durabilidade.

2.2.6. FIBRAS

É comum classificar as fibras como sendo de origem natural ou sintética. As fibras de sisal e de arroz são exemplos de fibras naturais, enquanto que as fibras de aço, de acrílico, carbono, nylon, poliéster, polietileno, polipropileno são exemplos de origem sintética. Neste estudo experimental utilizaram-se as fibras de aço.

Teixeira et al [3] referem que os principais benefícios do compósito com fibras de aço é o facto de estas aumentarem a ductilidade do material convencional, desempenhando um papel importante quando a absorção de energias se revela um aspeto preponderante, nomeadamente o comportamento das estruturas ao efeito dos sismos. As fibras melhoram também o desempenho do betão estrutural quando o esforço predominante é o de flexão, onde os valores da resistência podem sofrer aumentos de 50% relativamente ao valor da matriz com adição de 1 a 1,5% de incorporação de fibras relativamente ao volume do compósito. A adição adequada de fibras de aço controla a propagação de microfissuras no betão, isto porque as fibras atuam como “suturas” ou “agrafos” entre as fissuras, possibilitando a transmissão de tensões entre elas, conservando assim uma capacidade resistente residual que se traduz num comportamento dúctil do betão.

2.3. PROPRIEDADES DO BETÃO

A caracterização do betão deve ser feita em função do seu estado: fresco e endurecido. No estado fresco tem-se em consideração todas as propriedades que permitem a produção, transporte, manuseamento e colocação em obra. Após a compactação e acabamento das superfícies, o betão entra no estado endurecido começando a ser solicitado pelas diferentes ações estruturais e ambientais [1].

2.3.1. COMPORTAMENTO NO ESTADO FRESCO

O período durante o qual o betão está no estado fresco é insignificante relativamente ao seu tempo de vida total.

Quando se procede à mistura de água com as partículas de cimento, desencadeiam-se uma série de reações químicas exotérmicas, que se processam a velocidades diferentes interagindo entre si, fazendo com que os compostos hidratados adiram uns aos outros, conferindo propriedades de coesão e adesão ao cimento [6].

É geralmente aceite dividir-se o processo de hidratação do cimento em 5 períodos distintos, nomeadamente: período de pré-indução; indução; aceleração; pós-aceleração e limitação

difusional. A duração aproximada de cada período e a evolução do calor durante a hidratação do cimento podem ser observadas na Figura 2.2. [6]

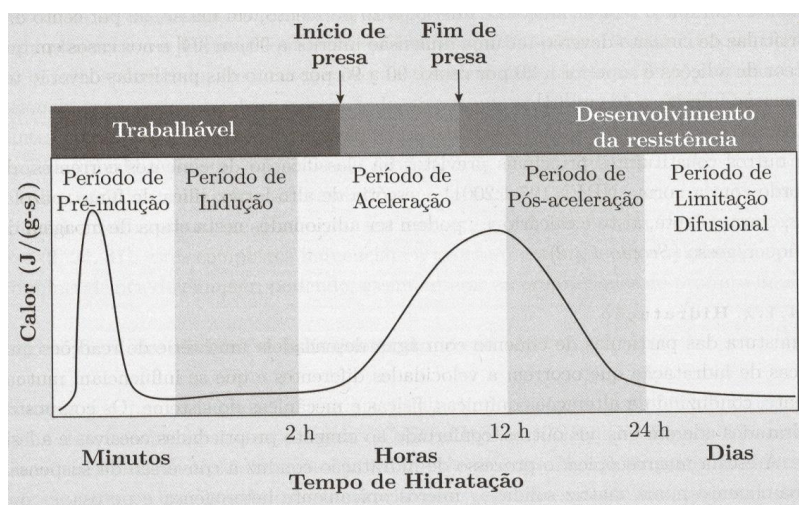


Figura 2.2 - Evolução do calor de hidratação do cimento no tempo (correspondência com os períodos do processo do mecanismo reacional) [6].

De acordo com Costa [6], e como é possível constatar na Figura 2.2, o período de pré-indução ocorre nos primeiros minutos, onde se observa uma visível libertação de calor inicial causada pela mistura do cimento com a água.

Segundo Coutinho [2] o período de indução corresponde ao momento logo após a amassadura da mistura da água com o cimento. Neste período a fluidez ou consistência da pasta mantém-se relativamente constante e, embora se verifique uma perda gradual de fluidez, é possível recuperá-la se se re-misturar a pasta. Segundo Costa [6] neste período as reações químicas ocorrem em pequena extensão, razão pela qual se constata uma libertação de calor pouco significativa.

No período de aceleração, a temperaturas normais e num intervalo de tempo entre 2 a 4 horas após a amassadura, a mistura ganha rigidez muito mais rapidamente, acabando por ocorrer o início de presa. Entre as 4 e as 12h dá-se a maior libertação de calor [2, 6].

Cessada esta fase do processo de hidratação do cimento, dá-se início ao período de pós-aceleração, e verifica-se uma diminuição progressiva no calor libertado, que segundo Costa [6] se deve a uma diminuição da velocidade de reações de hidratação acompanhada da diminuição gradual da fração de material não hidratado.

A partir das 24 horas o processo de hidratação dos compostos de cimento continua a desenvolver-se, apesar de ser a uma velocidade lenta, durante vários anos.

2.3.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A TEMPERATURA NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

Alguns dos fatores que influenciam a temperatura no processo de hidratação do cimento são a temperatura ambiente, relação água-cimento, adições, adjuvantes e fibras.

2.3.2.1. Temperatura de cura

Um dos fatores que influencia o processo de hidratação do cimento é a temperatura a que ocorre esse conjunto de reações e a própria quantidade de calor que é gerado nessas mesmas reações.

Silva [7] reporta que o desenvolvimento da resistência do betão nas primeiras idades é fortemente condicionado pela temperatura de cura. De facto, como a hidratação do cimento envolve um conjunto de reações químicas termo-activadas, cujos produtos originam a formação de um esqueleto sólido, a evolução da hidratação, e, portanto o desenvolvimento da resistência do betão, são dependentes da temperatura. Reporta ainda que a cinética da reação de hidratação do cimento pode ser traduzida por uma lei de Arrhenius, pelo que um aumento da temperatura de cura resulta numa aceleração do desenvolvimento da resistência do betão, enquanto uma diminuição daquela resulta numa desaceleração do processo de hidratação, e por consequência num atraso do desenvolvimento da resistência (ver Figura 2.3).

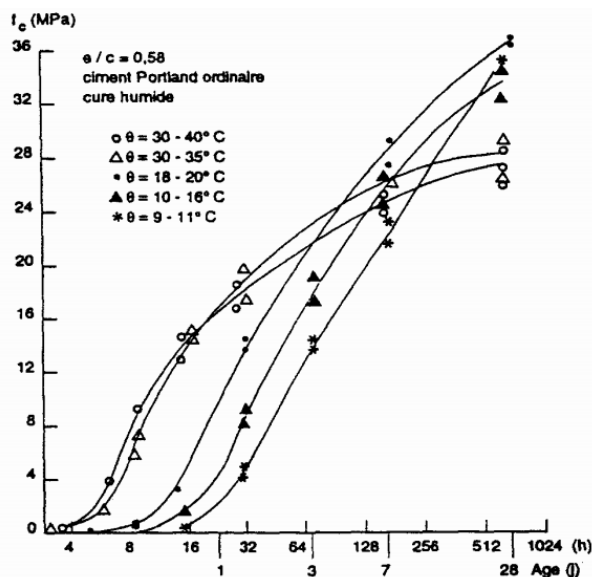


Figura 2.3 – Evolução da resistência à compressão para diferentes temperaturas de cura [7].

Silva [7] reporta que o aumento da temperatura de cura provoca um aumento, a curto prazo, da resistência do betão, mas igualmente uma diminuição da resistência à compressão a longo prazo, como documentado na Figura 2.3. A aceleração da reação de hidratação induz, portanto, a uma microestrutura com maior porosidade capilar, que resulta numa perda de resistência a longo prazo.

No estudo realizado por Silva [7] concluiu que a taxa de calor gerado (Figura 2.4) atinge valores mais elevados, e ocorre mais cedo, para ensaios isotérmicos realizados a temperaturas sucessivamente mais elevadas. Tal fenómeno era já expectável tendo em conta a natureza termo-ativada da reação de hidratação do cimento.

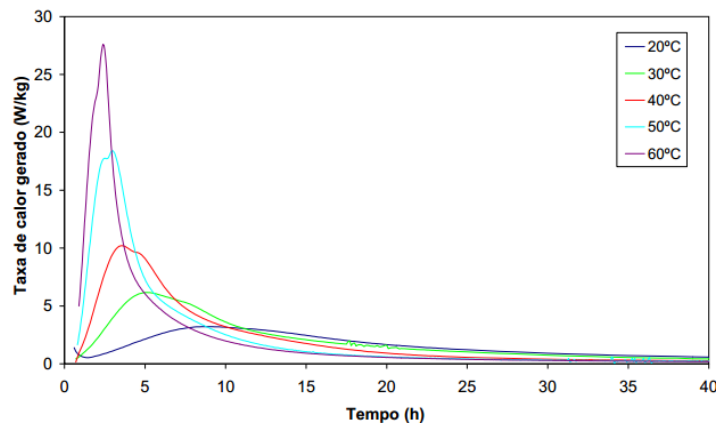


Figura 2.4 – Taxa de calor gerado para CEM I 42,5R [7].

Foram realizados outros ensaios com vários tipos de cimento diferentes e manteve-se a mesma tendência observada no gráfico anterior. Ou seja, quanto maior a temperatura de cura maior a taxa de calor gerado durante o processo de hidratação do cimento.

2.3.2.2. Adjuvantes

No estudo realizado por Ferreira [8] o adjuvante utilizado na mistura era um superplastificante redutor de água, constituído por carboxilatos modificados, aplicado em casos de transporte ou betonagem demorada, em formulações de betões de alta resistência e em betão auto-compactável.

As curvas da taxa de calor gerado ao longo da hidratação são apresentadas na Figura 2.5 para a pasta de cimento com e sem superplastificante (SP).

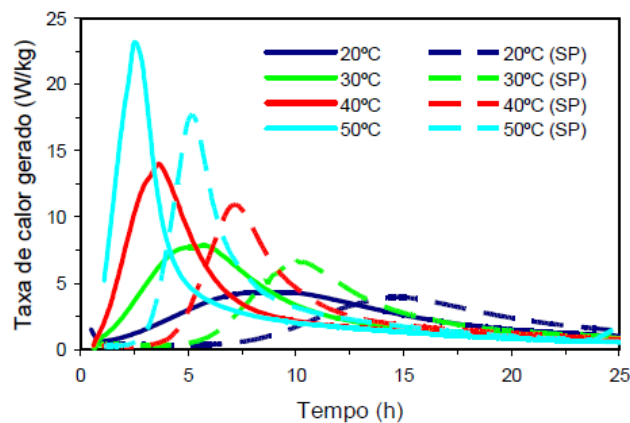


Figura 2.5 – Evolução da taxa de calor gerado do cimento CEM I 42,5R com e sem SP [8].

A partir da observação dos resultados calorimétricos, concluiu-se que a introdução do superplastificante na pasta de cimento altera a cinética da reação de hidratação, pois impõe um

atraso da evolução da taxa de geração do calor de hidratação. Concluiu-se também que a taxa de calor máxima e o calor potencial diminuí com a introdução do SP.

Refere ainda que a influência do superplastificante na reação de hidratação do cimento depende de inúmeros fatores, tais como o tipo de cimento, a natureza química do superplastificante, a existência de outras adições, etc.

2.3.2.3. Adições

Ferreira [8] estudou a influência da presença de filer calcário (FC) e concluiu que a sua presença no cimento não é totalmente desprezável no processo de hidratação (Figura 2.6). Assim, no cimento com filer calcário atingiram-se taxas máximas de calor gerado mais elevadas, e mais rapidamente do que para o cimento sem aquela adição.

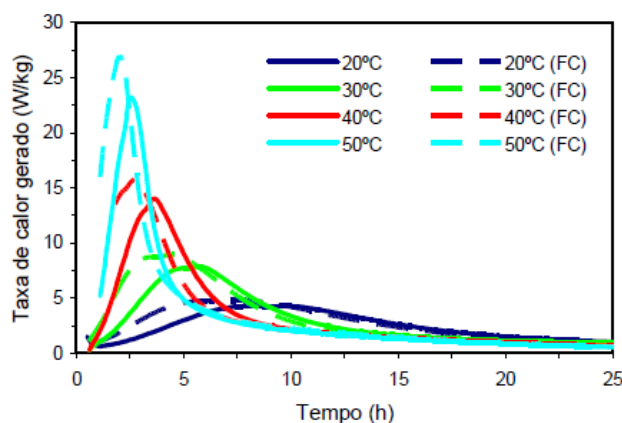


Figura 2.6 – Evolução da taxa de calor gerado do CEM I 42.5R com e sem FC [8].

Barluenga et al [9] realizaram um estudo experimental para estudar a influência de adições em betões de elevado desempenho nas primeiras 24 horas. Utilizaram uma composição de referência que continha apenas cimento e sem qualquer tipo de aditivos (HREF). Esta foi modificada ao ser introduzido um adjuvante redutor de água de amplo espectro, obtendo-se assim uma consistência auto-compactável (HREFG). Posteriormente, substituiu-se 50% do cimento por filer calcário (HCA) e obteve-se uma composição do tipo HAC (betão auto-compactável). Além destas, produziram-se mais composições em que parte do filer (entre 5-10%) foi substituído por adições: microsilica (HCAMS), nanosilica (HCANS) e metacaulino (HCAMC).

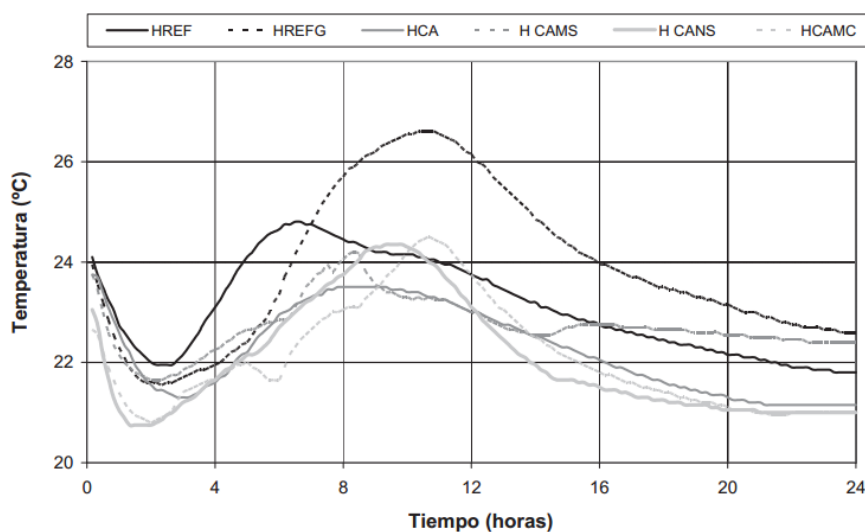


Figura 2.7 – Evolução da temperatura de HAC nas primeiras 24 horas [9].

Com base na Figura 2.7, os autores concluíram que: a inclusão de adjuvantes e adições modificam o processo de formação do betão nas primeiras idades; o adjuvante usado na composição HREFG retarda o processo térmico quando comparado com a composição HREF e que este atraso é atenuado pela inclusão de filer calcário.

2.4. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

2.4.1. MOLDES INSTRUMENTADOS

O processo de formação da micro-estrutura nas primeiras idades é de grande importância para os materiais cimentícios, pois depende diretamente dela as propriedades mecânicas do betão no estado endurecido.

Além disso, nas primeiras 48 horas existe uma grande diferença no estado físico do betão fresco, do betão endurecido, inviabilizando alguns tipos de ensaios aplicados no estado endurecido do betão, como é o caso do ensaio de resistência à compressão. Nesse sentido tem-se procurado desenvolver técnicas, métodos e dispositivos de ensaio que permitam avaliar a evolução da micro-estrutura e hidratação do cimento ao longo das primeiras 48 horas.

Nos últimos anos, alguns investigadores utilizaram a técnica de ondas ultrassônicas para desenvolver dispositivos instrumentados para estudar os materiais cimentícios durante as primeiras idades. Um exemplo disso é o desenvolvimento de um dispositivo instrumentado designado por UMA (ultrasonic monitoring apparatus), desenvolvido por Zhang et al [10], que permite, em medição contínua, avaliar o desenvolvimento do processo de formação da microestrutura em pastas de cimento, para diferentes temperaturas de cura.

2.4.2. RESISTIVIDADE

Para uma melhor compreensão do desenvolvimento e durabilidade do betão (nomeadamente corrosão das armaduras) têm sido investigadas as alterações nas propriedades elétricas do betão

com recurso a ensaios não destrutivos. Uma dessas propriedades é a resistência elétrica, e respetivamente, resistividade do material [11].

Os geólogos foram os primeiros a desenvolver a técnica de medição de resistência elétrica, para a avaliação da resistividade elétrica dos solos, recorrendo ao método clássico dos quatro elétrodos, como se pode constatar na Figura 2.8 a) [12]. Mais recentemente, este método, foi desenvolvido para avaliação da resistividade elétrica do betão em estruturas in-situ e em laboratório (Figura 2.8 b)) [13].

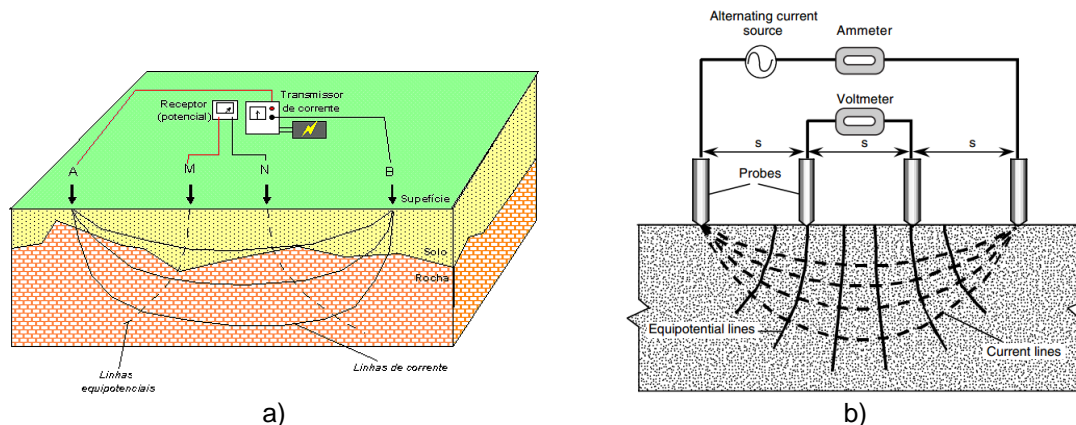


Figura 2.8 – Princípio de funcionamento utilizando a técnica dos 4 elétrodos (Sonda de Wenner): a) em solos [14]; b) em superfície de betão [15].

No caso de se utilizar a sonda de Wenner (4 elétrodos), o cálculo da resistividade elétrica (ρ) é feito da seguinte forma:

$$\rho = k \times R \Leftrightarrow k = 2 \times \pi \times a \Leftrightarrow R = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

Em que:

- ρ - é a resistividade elétrica em $k\Omega cm$;
- k - é uma constante geométrica da célula em cm;
- R - é a resistência elétrica do betão em $k\Omega$;
- I - é a intensidade elétrica que passa no circuito em mA ,
- V - diferença de potencial em Volts;
- a - distância entre os elétrodos.

Mais tarde, foram desenvolvidas e adaptadas outras técnicas para a medição da resistividade elétrica no betão, como a técnica dos dois elétrodos. Esta técnica utiliza dois elétrodos colocados em contacto com a superfície do betão ou embebidos no seu interior, que ao aplicar uma corrente elétrica, medindo a diferença de potencial e tendo em conta a lei de Ohm (que relaciona a intensidade aplicada e a diferença de potencial medido) obtém-se a resistência elétrica, tal como se apresenta na equação 2.2. A resistividade elétrica é obtida multiplicando a

resistência elétrica por uma constante geométrica que depende da secção reta (amostra ensaiada e do eléctrodo utilizado) e do comprimento entre eléctrodos [12].

$$R = \frac{V}{I} = \rho \times \frac{L}{A} \Leftrightarrow \rho = \frac{V}{I} \times \frac{A}{L} \quad (2.2)$$

Em que:

R – resistência elétrica (Ω);

V – diferença de potencial (V);

I – intensidade de corrente (A);

ρ – resistividade elétrica (Ωm);

A – área do eléctrodo em contacto com o provete (m^2) e,

L – distância entre eléctrodos (m).

Figura 2.9 é possível observar um esquema de ensaio que traduz a medição da resistividade elétrica usando a técnica dos 2 eléctrodos [16].

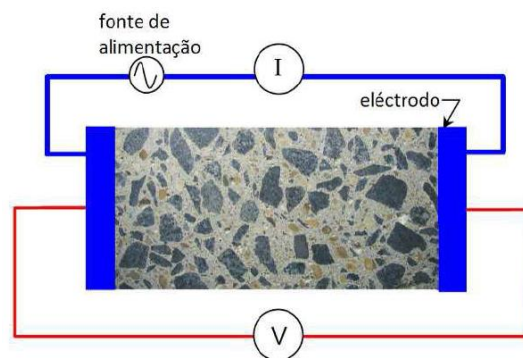


Figura 2.9 – Esquema representativo da medição de resistividade elétrica utilizando o método dos 2 eléctrodos [16].

2.4.2.1. Fatores que influenciam a resistividade elétrica do betão

Existem vários fatores que podem influenciar a resistividade elétrica no betão, desde o tipo e dosagem do ligante, razão água/cimento, tipo e concentração de agregados, adição de minerais reativos, à presença de adjuvantes e o efeito da temperatura e teor de humidade na medição da resistividade [17].

Silva [17] refere que a resistividade elétrica do betão está intimamente relacionada com a microestrutura da matriz cimentícia, nomeadamente, no que diz respeito à porosidade (estrutura e dimensão dos poros) assim como a concentração de iões e a sua mobilidade nos vazios da matriz.

Tendo em conta que, dos vários fatores que influenciam a resistividade só alguns deles é que foram analisados neste estudo experimental, apenas esses serão apresentados e discutidos nesta secção.

2.4.2.2. Razão água/cimento

Um dos parâmetros que mais influencia a qualidade do betão é a razão água/cimento uma vez que afeta as suas características mecânicas e a sua durabilidade. Tal como é referido por Silva [12] a razão água/cimento desempenha um papel fundamental na microestrutura da pasta de cimento e na concentração iónica da solução dos poros. Devido a estes efeitos, a resistividade elétrica do betão é influenciada pela razão água/cimento.

Silva [17] refere que o valor da resistividade elétrica da pasta de cimento para uma relação água/ligante de 0.4 foi de aproximadamente o dobro da pasta com uma relação água/ligante de 0.6. Nesse estudo, concluiu-se que a resistividade elétrica da pasta cimentícia aumentava, à medida que diminuía a relação água/ligante.

2.4.2.3. Tipo e concentração de agregados

No betão a resistividade elétrica dos agregados é muito superior à da pasta de cimento, portanto facilmente se percebe que o tipo e a concentração de agregados utilizados terá influência no valor final da resistividade no betão.

Em 1985, Hughes [18] efetuou um estudo experimental em que mediu a resistividade elétrica de betões com diferentes razões agregado/cimento. Quando a razão agregado/cimento passou de 2.92 para 4.36, a resistividade elétrica cresceu de 4.86 para 5.73 kOhm.cm, para uma razão w/c de 0.50. Concluindo que o aumento na dosagem de agregados resultará num aumento de resistividade.

2.4.2.4. Adições

Tal como é referido por Silva [17] quando se introduzem adições na fabricação de betão, estes materiais alteram a microestrutura da matriz cimentícia devido às suas características pozolânicas, influenciando a mobilidade dos iões presentes na solução porosa. De uma forma geral, as adições contribuem para uma diminuição da porosidade do betão, fazendo com que a resistividade elétrica seja superior quando comparada com a resistividade apresentada em betões produzidos exclusivamente com cimento Portland.

2.4.2.5. Adjuvantes

O efeito da adição de superplastificantes na resistividade do betão não está muito desenvolvido. No entanto, devido ao facto da sua utilização permitir uma redução na relação água/cimento, poderá provocar um aumento de resistividade.

2.4.2.6. Temperatura e Humidade

Tanto a temperatura como humidade desempenham papéis fundamentais na medição da resistividade elétrica do betão, em especial a humidade.

Tal como referido por Silva [12] e por Silva [17], o valor da resistividade varia com o efeito da temperatura. A resistividade elétrica do betão é em grande parte resultado da fase líquida presente nos poros do betão. Para uma humidade relativa constante, à medida que a temperatura aumenta, a viscosidade do fluido diminui fazendo com que haja um aumento da mobilidade dos

iões que transportam a corrente e, por consequência, uma diminuição da resistividade elétrica do material. Quanto ao efeito do teor de humidade na resistividade apresentada no betão faz-se sentir da seguinte forma: à medida que a humidade do betão diminui, a quantidade de água presente nos poros que transporta a corrente também diminui, desta forma faz com que haja um aumento da resistividade.

2.4.3. ULTRASSONS

A medição da velocidade de propagação das ondas de ultrassons pode ser utilizada para determinar a uniformidade do betão, a presença de vazios ou fendas, variações das propriedades com o tempo e as propriedades dinâmicas [19]. Segundo Naik et al [20] o método de ensaio de ultrassons pode ser usado para controlo de qualidade, bem como para a análise de deterioração. Pode ser ainda aplicado para a estimativa da resistência do betão, para verificar a homogeneidade do betão, em estudos sobre a hidratação do cimento, durabilidade do betão, na medição da profundidade da fissuração do betão e na determinação do módulo de elasticidade dinâmico do betão.

Como a aplicação do método da velocidade de impulso de ultrassons, UPV, recorre-se à utilização de ondas mecânicas e não há qualquer tipo de dano para o elemento de betão que está a ser testado, pelo que é considerado como um método não destrutivo. Além disso, um elemento ou uma amostra de betão, pode ser testada várias vezes, no mesmo local, o que é útil para se realizar um controlo do betão submetido a mudanças estruturais internas ao longo de um longo período de tempo [20].

2.4.3.1. Teoria da Propagação de Ondas

Quando é aplicada uma perturbação dinâmica numa superfície de um meio sólido elástico geram-se três tipos de propagação de ondas mecânicas: ondas de compressão (ondas longitudinais ou ondas P), ondas de corte (ondas transversais ou ondas S) e ondas superficiais (também designadas por ondas de Rayleigh).

As ondas de compressão propagam-se pelo meio sólido de uma forma análoga às ondas sonoras que se propagam através do ar. Cada tipo de onda propaga-se com uma velocidade característica. Para um dado sólido, as ondas de compressão têm uma velocidade maior quando comparada com as ondas de superfície. No betão, a velocidade das ondas de corte e de superfície, são geralmente de 60 e 55%, respectivamente, da velocidade da onda de compressão [20].

A velocidade de uma onda depende das propriedades elásticas e da densidade do meio. Em regimes elásticos, e em meios sólidos homogêneos, a velocidade de onda de compressão é dada pela seguinte equação:

$$V = \sqrt{\frac{KE}{\rho}} \quad (2.3)$$

Em que:

V – Velocidade da onda de compressão;

$K = (1 - \mu)/((1 + \mu)(1 - 2\mu))$;

E – módulo de elasticidade dinâmico;

ρ - densidade;
 μ - coeficiente de Poisson dinâmico.

2.4.3.2. Equipamentos de Ultrassons

Geralmente os equipamentos de medição comerciais seguem o princípio subjacente na norma NP EN 12504-4 2007 [19] que passa pelo seguinte raciocínio: existe um transdutor eletroacústico (emissor) em contacto com a superfície do betão a ensaiar que produz um conjunto de ondas longitudinais. Após ter percorrido um comprimento conhecido de betão, o conjunto de ondas é convertido em sinal elétrico por um segundo transdutor (recetor), sendo então medido, com um relógio eletrónico, o tempo de percurso. A frequência natural dos transdutores deverá estar normalmente dentro da gama de 20 kHz a 150 kHz. Na Figura 2.10 é possível visualizar uma representação esquemática do aparelho usado neste estudo experimental.

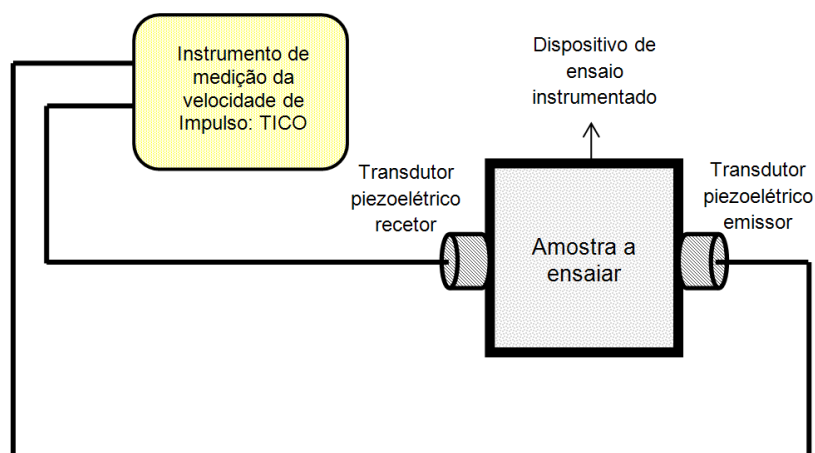


Figura 2.10 – Diagrama esquemático do circuito de ensaio de ultrassons.

2.4.3.3. Esquemas de medição

Conforme é possível visualizar na Figura 2.11 a realização de medições de ultrassons pode ser feita segundo três configurações:

- (1) transmissão direta,
- (2) transmissão semi-direta, e
- (3) transmissão indireta ou de superfície.

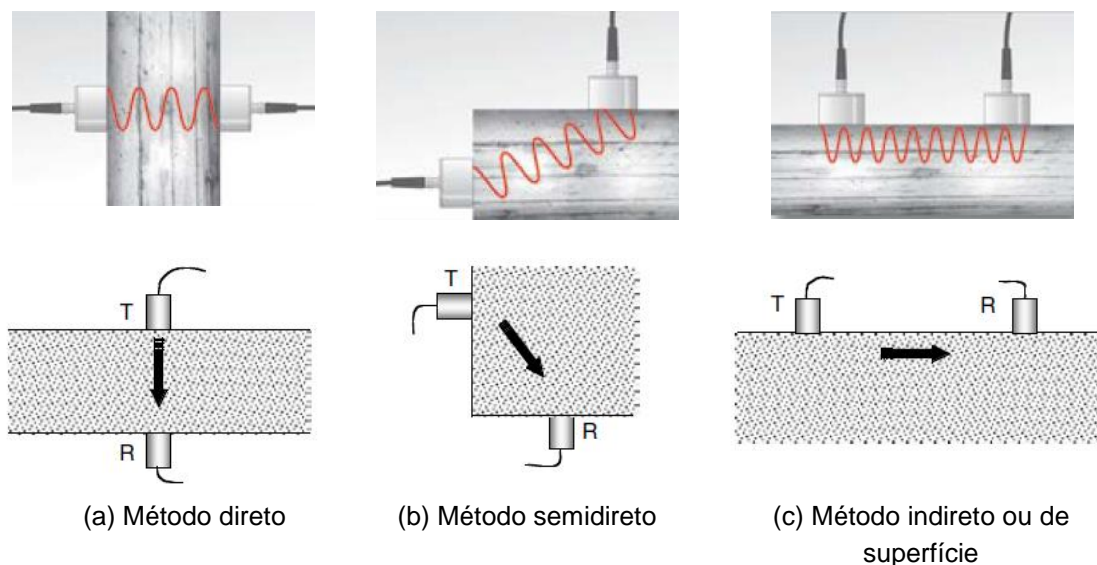


Figura 2.11 - Configurações de medição de velocidade de impulso. T: Transdutor transmissor; R: Transdutor Recetor [20, 21].

O método de transmissão direta é o mais desejável e é o método em que a disposição de transdutores apresenta melhor qualidade de resultados porque a energia máxima do impulso é transmitida e recebida segundo o mesmo eixo ou direção.

O método de transmissão semidirecto também pode ser utilizado de forma muito satisfatória. No entanto, o cuidado deve ser tido na distância entre os transdutores que não podem ser muito distantes um do outro, caso contrário, o sinal de impulso transmitido pode ser atenuado e pode dar-se o caso de não ser detetado. Este método é útil para evitar zonas com concentração de armadura. O método de transmissão indireta ou de superfície, é menos satisfatório porque a amplitude do sinal recebido é geralmente significativamente menor do que o recebido pelo método de transmissão direta [20].

2.4.3.4. Fatores que afetam a velocidade de impulso

São vários os fatores que podem interferir na determinação da velocidade de impulso, no entanto, é possível agrupar esses fatores numa categoria, em que estão diretamente relacionados com o betão e, noutra categoria, em que outros são independentes das propriedades do betão.

Os fatores que podem ser considerados como fazendo parte da categoria das propriedades do betão são: concentração de agregados, tipo de cimento, razão de água/cimento e a idade do betão.

Da categoria de fatores que não fazem parte das propriedades do betão são de referir: contacto do transdutor com o provete, temperatura do betão, fissuras e vazios, humidade e condições de cura do betão, comprimento de percurso, tamanho e forma da amostra, nível da carga aplicada na amostra, presença de armaduras.

Dos fatores anteriormente referidos, têm especial interesse aqueles que podem ter interferência no estudo experimental realizado, nomeadamente, razão água/cimento, idade do betão, contacto

do transdutor com o provete, temperatura do betão, condições de cura, comprimento de percurso, tamanho e forma da amostra.

- **Concentração de agregado:**

Para um mesmo nível de resistência do betão, concentrações de agregado mais altas resultam em velocidades de impulso mais elevadas [20].

- **Tipo de cimento:**

O tipo de cimento não tem um efeito significativo na velocidade de impulso, mas sim a taxa de hidratação, acrescentando que com o aumento do grau de hidratação, a velocidade de impulso também aumenta [20].

- **Razão água-cimento:**

Um aumento da relação água/cimento corresponde a uma diminuição da velocidade de onda de ultrassons [20].

- **Idade do betão:**

A velocidade de onda de ultrassons aumenta muito rapidamente nas primeiras idades e depois estabiliza [20].

Nesse sentido, Barluenga et al, [9] realizaram um estudo experimental com ultrassons, com o objetivo de caracterizar betões de elevado desempenho nas primeiras 24 horas.

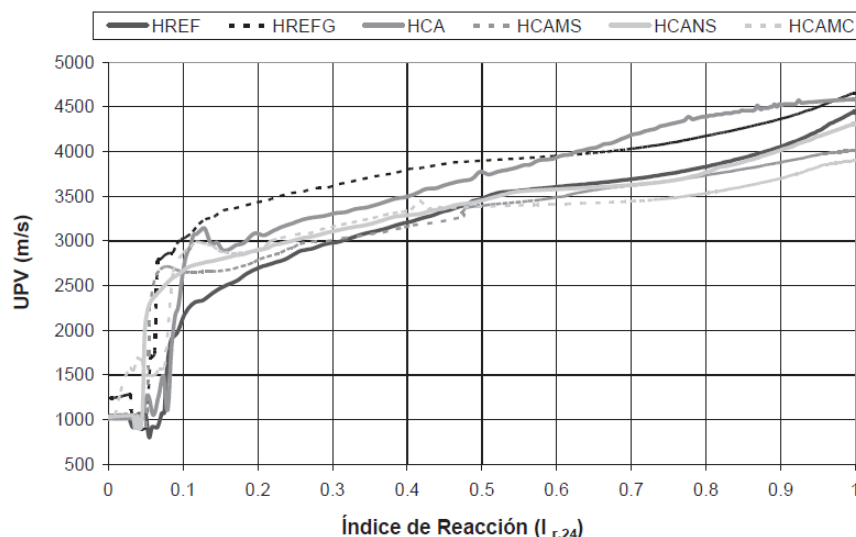


Figura 2.12 – Evolução da velocidade de propagação de ultrassons (UPV) durante 24 horas em função do índice de reação (Índice de Reacción) a 24 horas ($I_{r,24}$) [9].

A Figura 2.12 apresenta a evolução da velocidade de propagação de ultrassons ao longo de 24 horas ($I_{r,24}=1$) onde é possível identificar as 3 fases da evolução da microestrutura do betão: estado plástico, semi-rígido e rígido. Há uma fase em que se desenvolve muito rapidamente, num regime plástico rígido dentro das primeiras 4 horas, que corresponde a uma fase de $I_{r,24}$ entre 0,05 a 0,1.

- **Contacto do transdutor:**

No momento da realização do ensaio, os transdutores têm que ser ligeiramente pressionados por forma a garantir um perfeito contacto com o betão.

- **Temperatura do betão:**

As variações de temperatura entre 10 e 30 °C não induzem alterações na velocidade do impulso, apenas para temperaturas fora deste intervalo é necessário corrigir as medições da velocidade de ultrassons, recorrendo ao Quadro 2.2 [20].

Quadro 2.2 – Correções para a velocidade de impulso devido a mudanças de temperatura [20].

Temperatura do betão (°C)	Correção (%)	
	Betão seco ao ar	Betão saturado em água
60	+5	+4
40	+2	+1.7
20	0	0
0	-0.5	-1
< - 4	-1.5	-7.5

- **Humidade e condições de cura do betão:**

Para betões saturados a velocidade do impulso de ultrassons é maior do que para betões secos, e geralmente, a humidade tem menos influência sobre a velocidade em betões de alta resistência do que em betão de baixa resistência, devido à diferença na porosidade [20].

- **Comprimento do percurso:**

O comprimento de percurso percorrido pela onda ultrassónica, não deve afetar a velocidade de impulso, para isso, e segundo as recomendações RILEM, para amostras com 100 mm, o tamanho máximo do agregado deve ser de 30 mm e para amostras com 150 mm deve ter no máximo 45 mm [20].

- **Tamanho e forma da amostra:**

Segundo a norma NP EN 12504-4 2007 [19] a velocidade de propagação dos impulsos vibratórios curtos é independente da forma e da dimensão da amostra, salvo se a menor dimensão lateral for inferior a um valor mínimo. Abaixo deste mínimo, a velocidade de propagação pode ser apreciavelmente reduzida. O Quadro 2.3 mostra a relação entre a velocidade de ultrassons no betão e a frequência do transdutor para fazer recomendações sobre a mínima dimensão lateral da amostra.

Quadro 2.3 – Incidência das dimensões da amostra sobre a transmissão dos impulsos ultrassónicos [19].

Frequência do transdutor (kHz)	Velocidade de propagação dos ultrassons no betão (km/s)		
	$V_c = 3.50$	$V_c = 4.00$	$V_c = 4.50$
	Dimensão lateral mínima recomendada da amostra (mm)		
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

Em 2009, Zhang, Y. et al [10], estudaram o processo de formação da microestrutura nas primeiras idades em betões de elevado desempenho com diferentes tipos e misturas minerais (escória, cinzas volantes e sílica ativada fumos), agregados finos e grossos e diferentes percentagens de volume de fibras de aço (0%, 1%, 2% e 3%). Neste trabalho experimental foram medidas as velocidades longitudinais de impulsos ultrassónicos nos provetes e foi analisada a sua evolução. As composições usadas nesse estudo encontram-se identificadas no Quadro 2.4, em que as siglas PC, FA, BFS e SF, significam cimento Portland, cinzas volantes, escórias de alto-forno e sílica ativa, respetivamente.

Quadro 2.4 – Composições e proporções utilizadas no estudo experimental [10].

	Testing temperature (°C)	Compositions of biners (%)				Binder-to-sand ratio	Sand-to-aggregate ratio	Steel fiber content (%)
No.		PC	SF	FA	SL			
Cementitious pastes								
Cem1	90	100						
Cem2	90	70	30					
Cem3-20 °C	20	50	10	10	30			
Cem3-40 °C	40	50	10	10	30			
Cem3-60 °C	60	50	10	10	30			
Cem3-80 °C	80	50	10	10	30			
Cem3-90 °C	90	50	10	10	30			
Mortar								
Mort4	90	50	10	10	30	1:1		
Concrete								
Concr5	90	50	10	10	30	1:1	1:1	
Steel fiber concrete								
SFRC6	90	50	10	10	30	1:1	1:1	1
SFRC7	90	50	10	10	30	1:1	1:1	2
SFRC8	90	50	10	10	30	1:1	1:1	3

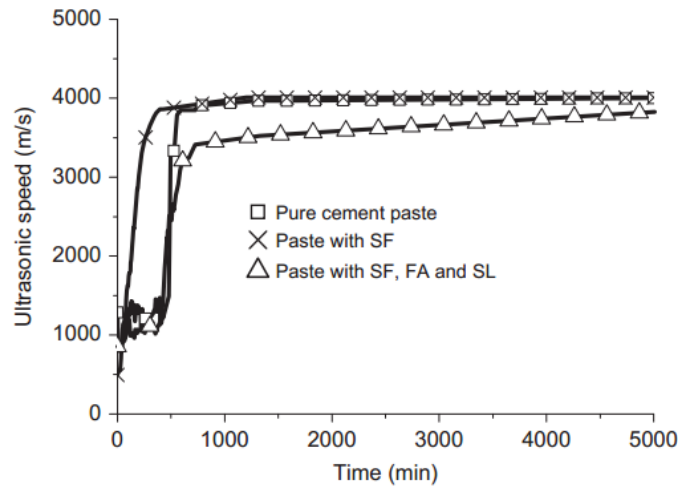


Figura 2.13 – Efeito da adição de minerais nos ultrassons [10].

Ao compararem as curvas de ultrassons (Figura 2.13), concluíram que a adição de sílica ativa acelera consideravelmente o processo de hidratação e, como consequência, o período de dormência de pasta com sílica ativa de fumos, é muito mais curto (24 minutos) do que a pasta de referência (129 minutos). Concluíram também que quando são incorporadas as cinzas volantes e escórias de alto-forno sucede o fenômeno inverso, ou seja, o período de dormência de pasta de cimento com cinzas volantes e escórias é 7 minutos maior do que o período de dormência da pasta de cimento de referência.

Também observaram que as adições de cinzas volantes e escórias de alto-forno reduziram a taxa de formação da microestrutura.

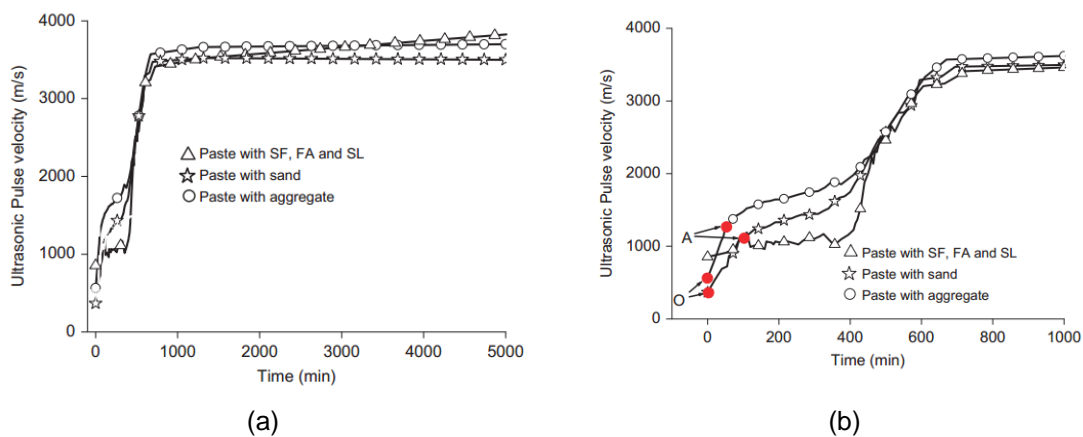


Figura 2.14 – Efeito de agregados finos e grossos nos ultrassons, de uma mesma pasta de cimento: (a) – ao longo de 5000 min; (b) – nos primeiros 1000 min [10].

Ao analisarem as curvas obtidas através dos valores de velocidade de propagação de ultrassons ao longo da hidratação das diferentes pastas em estudo devido à adição de agregados (Figura 2.14), concluíram que, no período inicial da hidratação, as curvas de velocidade de propagação de ultrassons são fortemente influenciadas. Além disso, concluíram que, enquanto nas pastas de

cimento a formação da sua microestrutura é caracterizada por três períodos distintos, perante o desenvolvimento da microestrutura de uma argamassa passam a existir quatro períodos. Por fim, constataram que a adição de agregados pode não influenciar o processo de hidratação de pastas de cimento se a analisarmos numa idade mais tardia, mas pode alterar a formação da microestrutura numa idade precoce.

2.5. ENSAIOS DESTRUTIVOS

Os ensaios destrutivos são realizados com o betão no estado endurecido. Martins et al [4] defendem que o ensaio da resistência é o mais importante dos aplicados ao betão e constitui a base para a determinação da qualidade do produto, em geral, uma resistência elevada significa que é um bom betão.

Para se conhecer a resistência de um material é necessário explicar o que se entende pelo fenómeno da rotura, o que se torna extremamente difícil pois não há uma definição perfeitamente geral. Segundo Coutinho [22] rotura pode ser encarada sob três aspetos principais: a) separação de um sólido contínuo em dois ou mais pedaços distintos; b) carga máxima suportada por uma peça solicitada de maneira geometricamente fixa; c) estado de deformação ou fissuração de tal modo excessivo que o material já não é utilizável.

2.5.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Vieira [1] enumera alguns fatores que influenciam a tensão que leva à rotura de um provete sujeito a uma força de compressão simples, uns são relativos ao material, como por exemplo, a razão água-cimento, a humidade, a resistência dos agregados, a compactação, o tipo de ligante, as condições de cura ou a idade, e, outros, que dependem das condições de ensaio, como por exemplo, a forma e a dimensão do provete, a velocidade de carga e outras características da prensa.

Martins et al [4] referem que o valor da resistência à compressão aumenta ao diminuir a razão água/cimento, ou seja, a resistência aumenta com a quantidade do cimento e, genericamente, diminui ao aumentar a quantidade de água. O autor refere ainda que ensaios não-destrutivos de ultrassons são mais indicados para verificar a uniformidade do betão *in-situ*, embora com este método se note uma perda notória da sensibilidade para níveis de resistência maiores.

Coutinho [2] refere que quando se necessita de uma correlação entre a velocidade do impulso de ultrassons e a resistência, é necessário estabelecê-la caso a caso para cada tipo de betão.

2.5.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Coutinho [2] refere que o ensaio de avaliação de resistência à tração do betão por via experimental é bastante complexo devido à fragilidade do material, desta forma, a tensão resistente de tração é determinada por via indireta com recurso a ensaios de compressão diametral, ou através de ensaios de flexão. O ensaio de flexão realiza-se conduzindo um betão simples à rotura por flexão através da aplicação de uma força concentrada no meio vão. Correlacionando a força aplicada ao provete com a tensão máxima de tração resultante dos esforços internos de flexão, obtém-se o valor da resistência à tração do betão associado à força de rotura.

Vieira [1] refere que a tensão de rotura à tração é influenciada pelos parâmetros que também interferem na resistência à compressão. Porém, na resistência à tração, a interface entre a pasta de cimento e a superfície do agregado assume especial importância. Por exemplo, betões com agregados rolados apresentarão, em geral, menor resistência à tração do que com agregados britados.

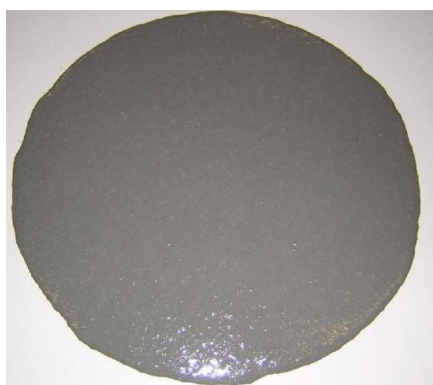
2.6. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

2.6.1. ESPALHAMENTO

O ensaio de espalhamento é um método de avaliação indireta da trabalhabilidade. Com este ensaio pretende-se aferir a tensão de cedência das pastas em função do tipo de cimento e do superplastificante [23].

O método mais utilizado para verificar a trabalhabilidade é o método de espalhamento que está descrito na norma NP EN 12350-8:2010 [24] no entanto para determinar a trabalhabilidade em pastas e argamassas, esta norma não é aplicável mas serve de guia para a aplicação com recurso a um mini-cone de pastas (Kantro) e de argamassas (tronco-cónico).

Quando a área de espalhamento é circular e apresenta um diâmetro de espalhamento suficiente, a pasta ou argamassa, apresenta uma trabalhabilidade adequada, se essa área não for circular apresenta uma trabalhabilidade inadequada (Figura 2.15) [25].



(a) – Trabalhabilidade adequada



(b) – Trabalhabilidade insuficiente

Figura 2.15 – Área de espalhamento: (a) circular; (b) não circular.

Vieira [23] refere que os resultados obtidos em pastas podem não ser extrapoláveis para betões, podendo não traduzir convenientemente o seu comportamento reológico. A autora refere que certas combinações de superplastificante com cimento podem apresentar um comportamento adequado em pastas e não atingir os desempenhos pretendidos em betões. No entanto, afirma nunca ter detetado uma combinação que apresentasse um comportamento deficiente em pastas e satisfatório em betões.

Assim, os ensaios em pastas podem fornecer indicações importantes acerca do comportamento reológico do sistema, necessitando de uma confirmação quanto ao seu uso em betões. A vantagem de usar este ensaio em pastas, é que este procedimento possibilita uma redução

substancial do número de amassaduras de betões, mais morosas e dispendiosas, envolvendo maiores quantidades dos vários componentes e de recursos humanos.

2.6.2. ENSAIO DE VICAT

O fenómeno de presa entende-se pela passagem do estado líquido ao sólido, que por outras palavras corresponde à rigidificação da pasta de cimento. Distinguem-se dois períodos para o tempo de presa: início e fim. O início de presa traduz-se como sendo o tempo que decorre desde a fabricação da amassadura até se dar a sua perda de plasticidade, enquanto que o fim de presa corresponde ao período de tempo que a pasta necessita para possuir uma consistência que consiga suportar uma determinada pressão [2].

O procedimento que rege a determinação do tempo de presa em pastas está descrito na norma NP EN 196-3 [26]. O tempo de presa depende do tipo de ligante, diminuindo com o aumento da temperatura a que o betão está exposto.

Segundo a norma supracitada, a pasta de cimento de consistência normal tem uma resistência especificada à penetração de uma sonda normalizada. A água necessária para uma tal pasta é determinada por sucessivos ensaios de penetração em pastas com quantidades de água diferentes. O tempo de presa é determinado observando a penetração de uma agulha numa pasta de cimento de consistência normal até ao momento em que atinge um valor especificado de 6 ± 3 mm [26].

3

DESENVOLVIMENTO DO MOLDE INSTRUMENTADO

3.1. INTRODUÇÃO

Um dos principais objetivos deste estudo experimental passou por conceber e construir um molde instrumentado para avaliar os seus efeitos na evolução da hidratação em pastas, argamassas e betões nas primeiras idades (48 horas) com capacidade de medir três grandezas: temperatura, resistividade e ultrassons.

Nesse sentido, após um estudo prévio do estado da arte, optou-se por desenvolver um molde instrumentado com capacidade de registar a evolução da temperatura de forma contínua e tendo em conta as limitações de tempo para a realização deste trabalho experimental, registar a evolução da resistividade e de ultrassons de forma discreta e indireta, apenas através da ação de um operador.

3.2. REQUISITOS DO MOLDE INSTRUMENTADO

Os requisitos a que o molde instrumentado esteve sujeito no momento da sua conceção foram os seguintes:

- Fácil montagem aquando da preparação inicial do ensaio e de fácil desmontagem após a finalização do ensaio;
- Leve, de fácil transporte e limpeza;
- Robusto e reutilizável para um elevado número de ensaios experimentais;
- Capacidade para medir a evolução da temperatura ao longo das primeiras 48 horas de hidratação do cimento;
- Permitir uma leitura de resistividade e de ultrassons em regime discreto, através da ação de um operador, sem que os transdutores piezoelétricos do aparelho ultrassónico estivessem em contacto direto com a pasta ou argamassa e,
- Atribuir uma forma cúbica, de 100 mm de aresta, aos provetes de pastas e argamassas resultantes do desmolde.

3.2.1. TEMPERATURA

A medição da temperatura na hidratação do cimento foi realizada na base do molde de ensaio instrumentado e foi materializada através da implementação de um detetor térmico que ficou implantado ao nível superior da base do mesmo e, em simultâneo, ficou embebido em acrílico por forma a ficar protegido da ação química das pastas e argamassas e de choques mecânicos. Na Figura 3.1 é possível visualizar o detetor térmico na parte superior da base do molde de ensaio instrumentado.



Figura 3.1 – Localização do detetor térmico no molde de ensaio instrumentado.

O detetor térmico utilizado foi o RTD (Resistance Temperature Detector) de platina, que é vulgarmente denominado por PT100. Este sensor foi construído a partir de um filme metálico depositado sobre uma placa de cerâmica e a escolha deste detetor prendeu-se com a sua facilidade de construção, rápida resposta térmica, elevada precisão (na ordem de $\pm 0.1^\circ\text{C}$) e elevada estabilidade térmica. Na Figura 3.2 representa-se o elemento sensor em forma de filme depositado sobre um substrato cerâmico.



Figura 3.2 – Detetor térmico RTD [8].

Por sua vez o detetor foi ligado a um Datataker DT 505, responsável pela aquisição e armazenamento dos valores medidos da temperatura ao longo do ensaio. Como o Datataker estava ligado a um computador portátil, era também possível observar a respetiva evolução da temperatura em tempo real (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Sistema de ensaio para medição de temperatura: (a) computador portátil; (b) Datataker DT 505; (c) fios de ligação do detetor térmico do molde ao Datataker DT 505.

3.2.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A técnica utilizada para a medição da resistividade elétrica ao longo das primeiras 48 horas de hidratação do cimento, foi a técnica dos dois eléctrodos. Esta técnica utiliza dois eléctrodos (através de duas redes metálicas embebidas na pasta ou argamassa de cimento), aplica-se uma corrente elétrica e regista-se a diferença de potencial. Com o conhecimento do valor da corrente elétrica e com a diferença de potencial, determina-se a resistividade elétrica. Na Figura 3.4 é possível visualizar uma representação esquemática dos dois eléctrodos mencionados na técnica supracitada e o resultado final de um provete depois de passar 48 horas da sua cura dentro do molde de ensaio instrumentado.

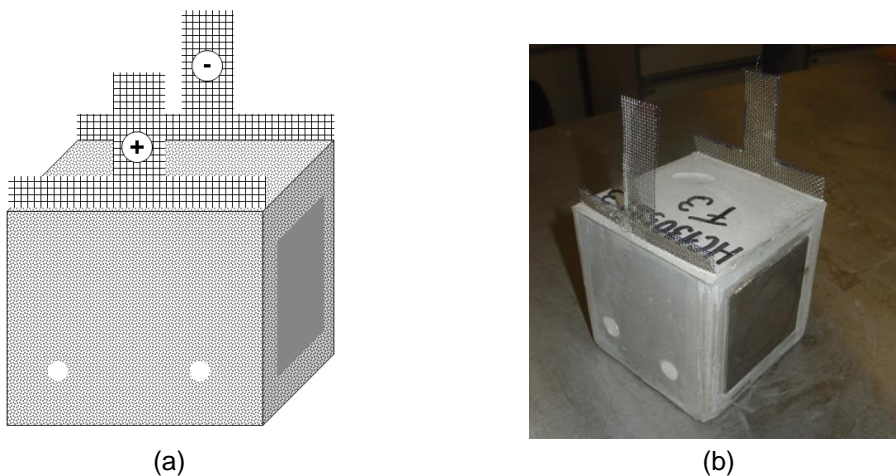


Figura 3.4 – Provette cúbico com redes para medição de resistividade.

Tendo em conta o modo de execução da técnica e querendo minimizar a troca de energia com o exterior, sob a forma de temperatura, entre a pasta ou a argamassa a ensaiar, optou-se por utilizar duas redes metálicas a servirem de eléctrodos e, por forma a garantir um perfeito contato entre os mesmos e a pasta ou argamassa em estudo, decidiu-se embebê-las na pasta ou na argamassa, sendo que, estariam sempre encostadas e fixas nas faces do molde com varões roscados. Tal como é possível visualizar na Figura 3.5.

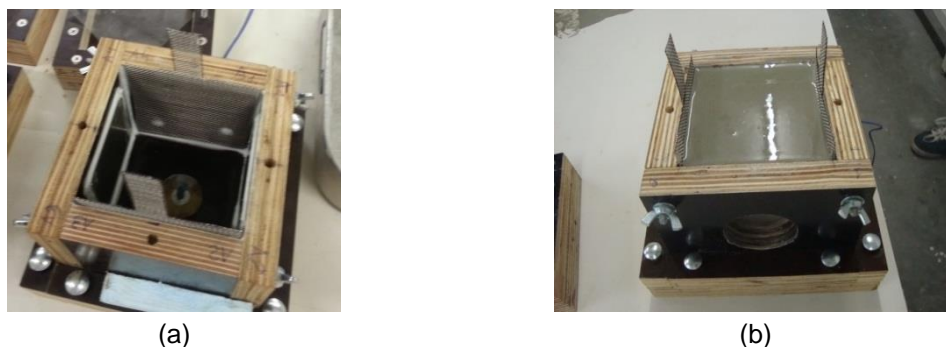


Figura 3.5 – Molde com redes metálicas para medição da resistividade: (a) redes encostadas e fixas às faces do molde; (b) redes embebidas na pasta ou argamassa.

Para tal, houve necessidade de proceder à furação da tampa do molde para permitir a saída dos filamentos das redes, que permitiam medir a corrente elétrica e a diferença de potencial.

A abertura de furos, efetuada somente no segundo protótipo, veio contribuir para um menor isolamento térmico do molde de ensaio instrumentado, no entanto, tentou compensar-se o efeito dessas aberturas com o preenchimento dos mesmos com papel absorvente (Figura 3.6).



Figura 3.6 – (a) Molde com tampa com orifícios para passagem da rede; (b) orifícios da tampa tapados com papel.

3.2.3. ULTRASSONS

De forma a ser possível registar a evolução do tempo de percurso de ultrassons na hidratação do cimento ao longo das primeiras 48 horas, optou-se por utilizar-se um aparelho com capacidade de medir o tempo de viagem do impulso da onda emitida no meio.

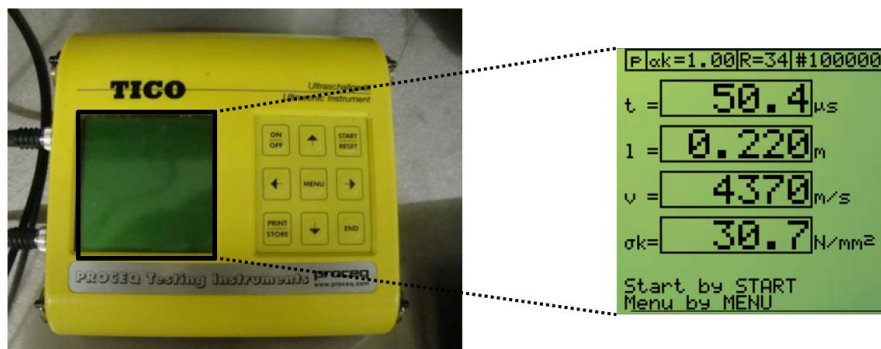


Figura 3.7 Exemplo de visualização do valor do tempo de percurso de uma onda no ecrã do aparelho ultrassónico TICO.

O equipamento ultrassónico utilizado para este efeito foi o TICO da Proceq Testing Instruments (Figura 3.7). Este equipamento é constituído por dois transdutores piezoelétricos, em que um deles é usado como emissor de ondas e o outro como recetor. Cada transdutor possui uma forma cilíndrica, com 49.5 mm de diâmetro e uma altura de 34 mm (Figura 3.8).

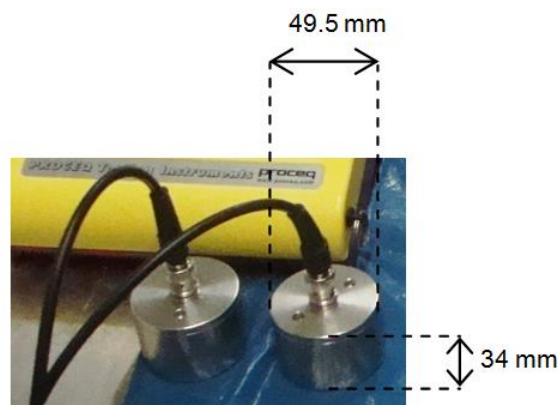


Figura 3.8 – Dimensões dos transdutores piezoelétricos.

Dadas as características deste equipamento e sabendo de antemão que o método de transmissão direta é aquele em que a disposição de transdutores apresenta melhor qualidade de resultados porque a energia máxima do impulso é transmitida e recebida segundo o mesmo eixo ou direção, houve necessidade de criar dois orifícios no molde de ensaio para o encaixe dos respetivos transdutores piezoelétricos, sendo que o orifício foi executado no centro de uma das faces do molde, ficando perfeitamente alinhados, conforme se poderá visualizar na Figura 3.9 (b).

O orifício da face do molde possui um diâmetro que varia entre 50 a 55 mm. A dimensão adotada no diâmetro do molde respeitou duas condições: tinha que ser largo o suficiente para tentar evitar que as ondas se propagassem através das faces do molde e, ao mesmo tempo, que a folga entre o orifício e o transdutor não permitisse a queda do transdutor durante o ensaio (Figura 3.9 (c)).

Para garantir que não havia contacto direto entre os transdutores (para não serem danificados e porque o ensaio é iniciado com as pastas no estado fresco) e a pasta ou argamassa a ensaiar, foram colocadas no lado interno de cada face do molde com orifício, umas chapas metálicas quadradas, com 70 mm de aresta com uma espessura de 2 mm.

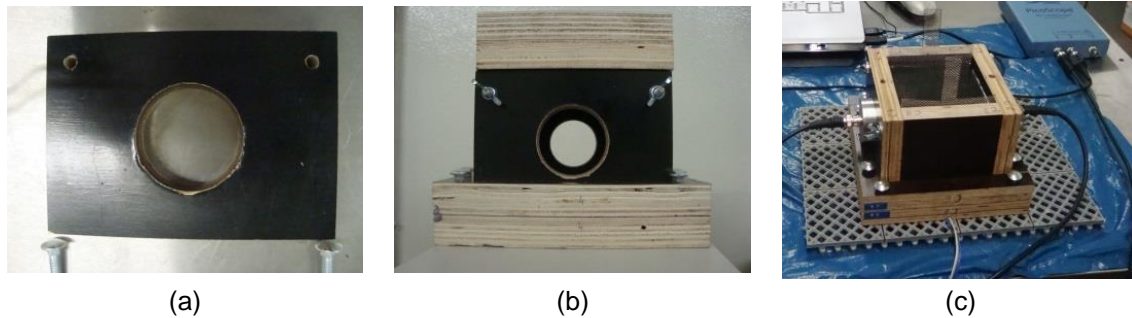


Figura 3.9 – (a) Face com orifício; (b) faces opostas com orifícios alinhados; (c) encaixe dos transdutores nos orifícios do molde.

3.3. MOLDES DE ENSAIO CONCEBIDOS

Tendo em conta os requisitos do molde de ensaio instrumentado para a sua conceção, a metodologia e os equipamentos de ensaio que foram utilizados ao longo de todo o trabalho experimental, criou-se um primeiro protótipo que tentasse dar resposta a todas essas particularidades, designando-o por HC1.

Como se pode observar na Figura 3.10 o molde HC1 era constituído por uma base, quatro peças delimitadoras, quatro faces sendo que duas delas possuem orifícios de forma circular, duas peças fixadoras das faces com orifícios e uma tampa.

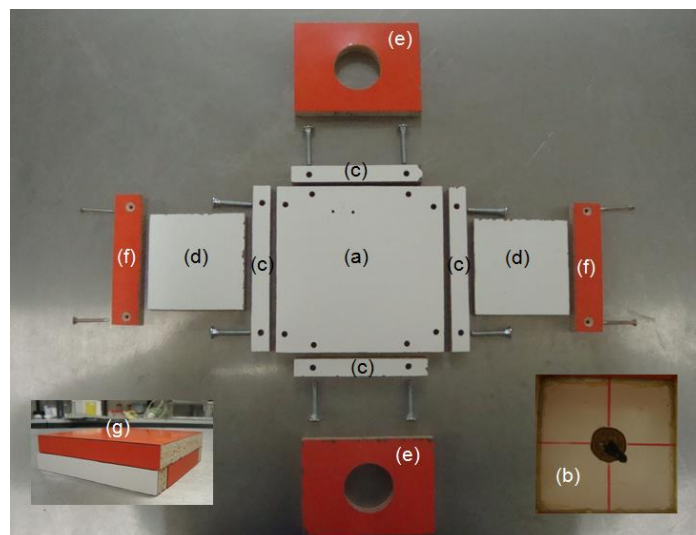


Figura 3.10 – Molde instrumentado HC1: (a) base; (b) base com detetor térmico; (c) peças delimitadoras; (d) faces do molde, (e) faces do molde com orifício; (f) peças fixadoras das faces; (g) tampa.

O material constituinte do HC1 era tabuapan, com acabamento em fórmica branca e laranja.

A montagem deste molde começava por colocar as peças delimitadoras sobre a base e fixá-las com parafusos (Figura 3.11 (a)), de seguida procedia-se à fixação das faces com orifícios com recurso às peças fixadoras (Figura 3.11 (b)), usando para o efeito parafusos, apertados com uma parafusadora. Concluída esta etapa procedia-se à colocação das faces com orifícios em cima da base, no espaço criado pelas peças delimitadoras e colocavam-se as duas faces restantes de forma a obter a forma cúbica para o provete final (Figura 3.11 (c)) e por fim, colocava-se a tampa. Na Figura 3.11 (d) pode-se observar o aspeto final do molde HC1.

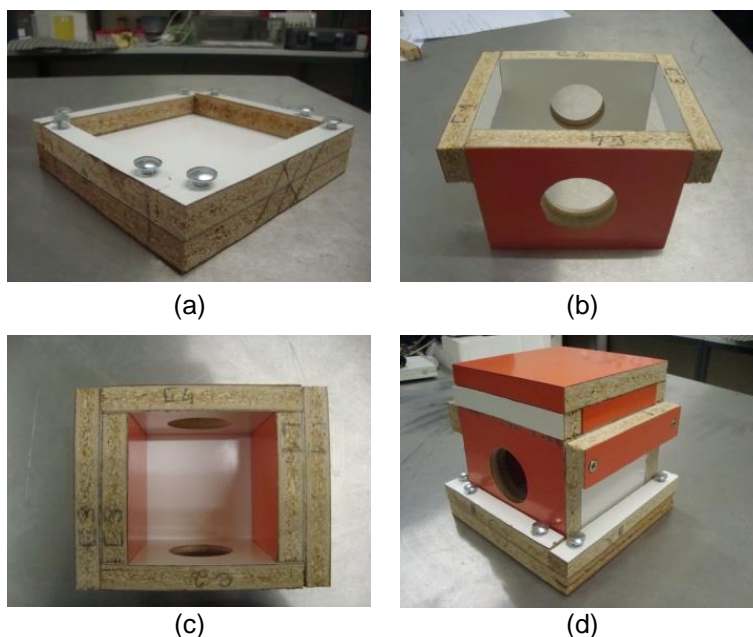


Figura 3.11 – (a) Base com peças delimitadoras; (b) faces com orifícios com peças fixadoras; (c) e (d) molde pronto para dar a forma cúbica ao provete.

Na preparação do molde para a realização do ensaio foram colocadas no lado interno de cada face do molde com orifício, uma folha de acetato com forma quadrada, fixa com fita-cola. As redes para a medição da resistividade possuíam dimensões de 100 mm de largura por 120 mm de altura e eram colocadas na posição de ensaio apenas pela pressão hidrostática da pasta ou argamassa de cimento.

Após a sua utilização em dois ensaios consecutivos, o molde HC1 deixou de oferecer condições para voltar a ser reutilizado devido aos seguintes problemas:

1. No momento do enchimento do molde com a pasta de cimento, este não oferecia estanqueidade suficiente, permitindo assim o vazamento da respetiva pasta (Figura 3.12);



Figura 3.12 – Fuga da pasta ou argamassa pelas arestas do molde.

2. O facto do molde ser constituído por tabuapan, e este material não oferecer uma boa resistência quando em contacto com água (desfazia-se e aumentava de volume devido à absorção de água), provocou a danificação do mesmo e destacamento da fórmica (Figura 3.13 (a));
3. Sempre que se pretendia efetuar a medição da resistividade implicava a retirada da tampa do molde durante todo o período dessa medição, permitindo assim evaporação da água e libertação de calor gerado no processo de hidratação do cimento, interferindo assim na formação da microestrutura da pasta ou argamassa (Figura 3.13 (b));



(a)



(b)

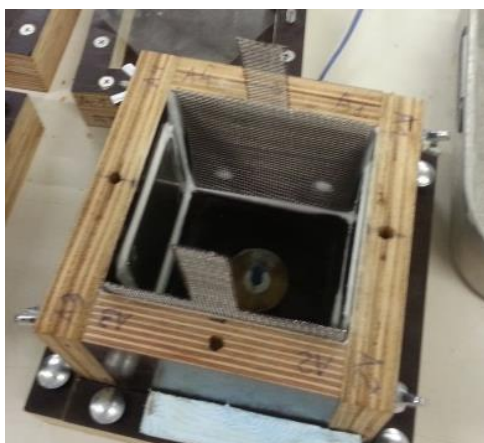
Figura 3.13 – (a) Destacamento da fórmica; (b) molde sem tampa para medição da resistividade

4. O método de fixação com fita-cola das folhas de acetato não foi o suficiente para permitir a estanqueidade do orifício para aplicação dos transdutores a ponto de evitar a fuga de pasta pelo mesmo, fazendo com que este diminuísse a sua secção útil e dificultasse a entrada dos transdutores para medição da velocidade de ultrassons devido à absorção de água.
5. Na segunda utilização do molde HC1 substituíram-se as folhas de acetato por chapas metálicas e colocou-se cola quente nas arestas interiores do molde, a fim de evitar a fuga da pasta de cimento, pelas arestas e pelos orifícios, no entanto, verificaram-se os mesmos problemas referidos nos pontos 1 a 4.

Dadas estas circunstâncias, houve necessidade de proceder ao fabrico de um novo molde de ensaio que se designou por HC2. Tendo em conta os problemas manifestados com o molde HC1, implementaram-se as seguintes alterações:

1. A constituição do molde passou a ser em contraplacado marítimo e foi sujeito ao tratamento de envernizamento nas superfícies de corte, dando assim resposta ao problema da durabilidade e redução da área da secção dos orifícios da face do molde;
2. Para dar resposta à problemática da estanqueidade, decidiu-se siliconar as arestas internas do molde HC2 e os bordos das chapas metálicas, servindo assim como meio de estanqueidade e fixação (Figura 3.14 (a));
3. Para evitar interferência no processo de hidratação do cimento sempre que se realizava a medição da resistividade, optou-se por alterar a forma da rede metálica e perfurar a tampa de forma a permitir a passagem de uma parte desta rede, permitindo assim a permanência da tampa imóvel e a realização do ensaio de resistividade;
4. Com a colocação de varões roscados em duas das quatro paredes e recorrendo à utilização de porcas de orelhas, deixou de ser necessário recorrer a qualquer tipo de ferramenta para proceder à montagem do molde.

Desta forma na Figura 3.14 (b) é possível visualizar o molde final.



(a)



(b)

Figura 3.14 – (a) Interior do molde com arestas siliconadas; (b) molde completo.

Tendo em conta que as problemáticas foram ultrapassadas e com o intuito de poder realizar vários estudos paramétricos de diferentes pastas, argamassa e betões, ao ritmo de um por semana, de forma a estudar separadamente a influência de diferentes componentes da mistura, partindo de misturas mais simples para misturas mais complexas, construíram-se mais três moldes em tudo semelhantes ao HC2, sendo designados por HC2A, HC2B e HC2C. Na Figura 3.15 é possível observar todos os moldes de ensaio instrumentados concebidos e utilizados ao longo deste trabalho experimental.

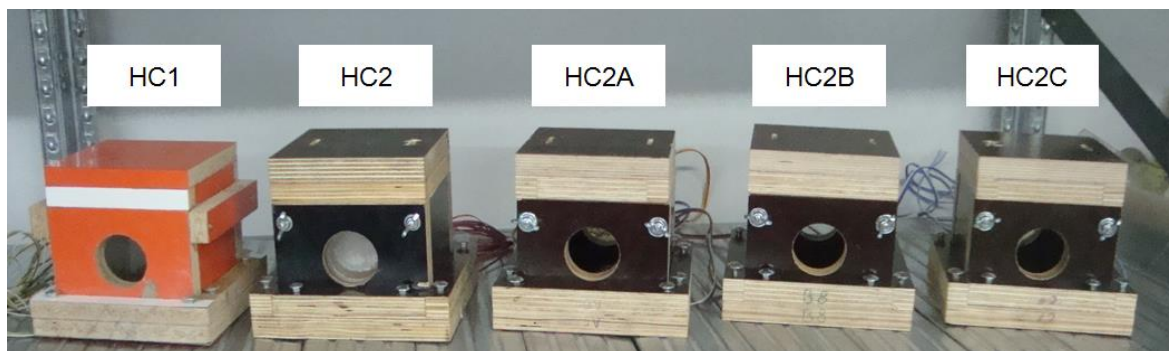


Figura 3.15 – Conjunto de moldes concebidos e utilizados neste trabalho experimental.

4

PROTOCOLO DE ENSAIO

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado, à exceção da fase de tratamentos e análise de resultados, um procedimento exemplificativo para as principais fases do ensaio experimental, nomeadamente, preparação do molde, preparação da amassadura, fecho do molde para início dos ensaios, desmoldagem e armazenamento dos provetes.

Serão apresentados os materiais utilizados na constituição das diferentes amassaduras, o procedimento adotado na fabricação de provetes prismáticos, o procedimento de registo da temperatura, resistividade elétrica, velocidade de propagação de ultrassons, o procedimento de ensaio de espalhamento, ensaio de Vicat, ensaio de tração indireta por flexão e compressão.

Além disso, apresenta-se o sistema experimental e a calendarização semanal dos trabalhos experimentais.

4.2. PREPARAÇÃO DO MOLDE

Na Figura 4.1 podemos observar um molde de ensaio instrumentado desmontado.

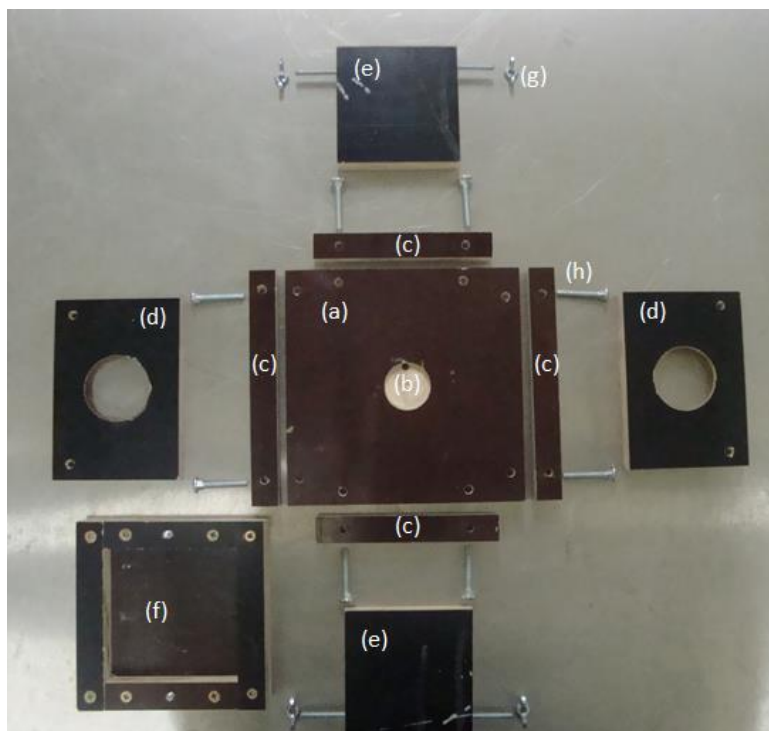


Figura 4.1 – Molde instrumentado: (a) base; (b) orifício para colocação do detetor térmico; (c) peças de delimitadoras; faces do molde: (d) com orifício circular e (e) com varões roscados; (f) tampa; (g) porca de orelhas; (h) parafuso.

O procedimento de montagem do molde de ensaio foi o seguinte:

1. Colocaram-se as peças delimitadoras sobre a base e fixaram-se com parafusos (Figura 4.1 (c), (a) e (h));
2. Com recurso a uma pistola de silicone, vedaram-se os bordos das chapas metálicas de forma centrada nas faces com orifício para os transdutores;
3. Após a secagem do silicone nas chapas metálicas (aproximadamente 2 horas), encaixaram-se de forma ordenada, as duas faces com orifícios nas faces com varões roscados, fixaram-se as quatro faces entre si, com anilhas e porcas de orelhas e colocaram-se na base do molde, dentro do espaço confinado pelas peças delimitadoras;
4. Vedaram-se as arestas interiores do molde de ensaio instrumentado por forma a garantir estanqueidade do mesmo e deixou-se secar.
5. Fixaram-se as redes metálicas para a medição de resistividade, com dois pingos de silicone em cada uma, tal como é possível observar na Figura 4.2 (b) e (c).
6. Depois do silicone de fixação secar, colocou-se óleo descofrante na base do molde e estava pronto para receber a pasta ou a argamassa. As dimensões da rede metálica utilizada podem ser observadas na Figura 4.2 (a).

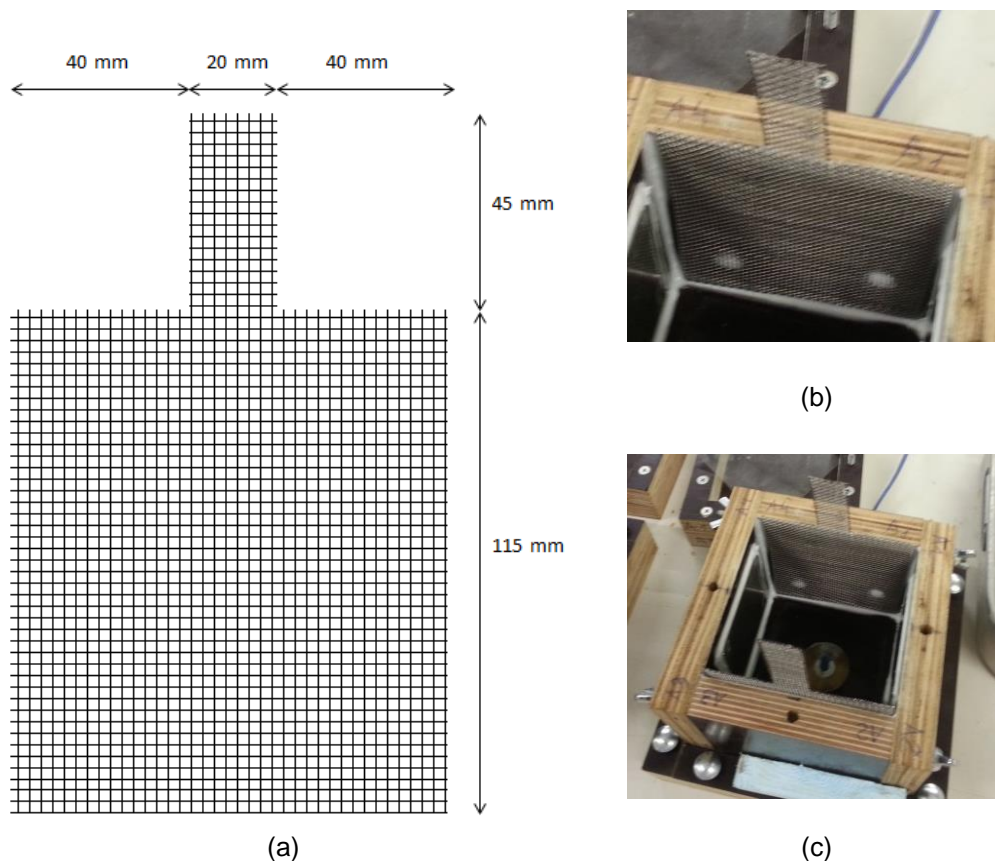


Figura 4.2 – (a) Dimensões da rede; (b) e (c) disposição da rede no molde.

4.3. PREPARAÇÃO DA AMASSADURA

O procedimento adotado na preparação das amassaduras ao longo do trabalho experimental foi o seguinte:

1. Procedeu-se à recolha e pesagem dos vários constituintes da amassadura a ser fabricada;
2. Misturaram-se os agregados finos, cimento, adições e cerca de 80% da água total e registou-se a hora de início de amassadura;
3. Colocou-se a misturadora em funcionamento a uma velocidade lenta durante 60 segundos;
4. Retirou-se o material aderente nas paredes e pá da misturadora (aproximadamente 10 segundos);
5. Retomou-se o funcionamento da misturadora a uma velocidade lenta durante 60 segundos;
6. Adicionou-se o superplastificante e a restante percentagem de água (cerca de 20%);
7. Retomou-se o funcionamento da misturadora a uma velocidade lenta durante 60 segundos;
8. Retirou-se o material aderente nas paredes e pá da misturadora (aproximadamente 10 segundos);
9. Retomou-se o funcionamento da misturadora a uma velocidade lenta durante 30 segundos;
10. Deixou-se repousar durante 5 minutos;

11. Colocou-se a misturadora em funcionamento a uma velocidade rápida durante 30 segundos.
12. No caso de existir adição de fibras de aço, estas foram adicionadas à amassadura e procedeu-se à sua mistura a uma velocidade lenta durante 60 segundos.

Na Figura 4.3 é possível observar os equipamentos utilizados na preparação das amassaduras.



Misturadora

Cronómetro

Balança

Figura 4.3 – Equipamentos utilizados na preparação das amassaduras.

4.4.FECHO DO MOLDE PARA INÍCIO DE ENSAIOS

O procedimento adotado para o fecho do molde instrumentado foi o seguinte:

1. Verteu-se $\frac{3}{4}$ da pasta ou argamassa para o interior do molde (Figura 4.4), após ser verificada a sua estanqueidade com água.



Figura 4.4 – Colocação da pasta no molde de ensaio.

2. Verteu-se o restante $\frac{1}{4}$ da pasta ou argamassa, na sala de ensaios de forma a facilitar o transporte do molde semi-cheio da sala de produção para a sala de realização dos ensaios;
3. Colocou-se acetato sobre a superfície da pasta ou argamassa e uma “escora” a separar e fixar as redes na zona superior do molde (Figura 4.5).



Figura 4.5 – (a) Acetato por cima da pasta; (b) Escora a separar e fixar as redes.

4. Colocou-se a tampa, fazendo coincidir os orifícios com as redes e tapou-se o espaço que ficava entre os orifícios da tampa e os filamentos da rede metálica para medição de resistividade, com papel absorvente de maneira a evitar trocas de calor e perda de humidade entre a pasta ou argamassa e o exterior (ver Figura 4.6).



Figura 4.6 – (a) – Tampa do molde com orifícios para a passagem das redes; (b) molde montado.

4.5. MATERIAIS CONSTITUINTES DAS AMASSADURAS

Neste trabalho experimental para a produção das amassaduras utilizou-se cimento (CEM I 42.5 R) com uma densidade de 3160 kg/m^3 (Secil-Maceira), filer calcário (BETOCARB P1 – OU) com uma densidade 2680 kg/m^3 (Comital), sílica de fumo (Centrilit Fume SX em suspensão com 50% de teor de sólidos) com densidade de 1380 kg/m^3 (MC – Bauchemie), fibras de aço de 6, 9 e 12 mm (KrampeHarex DM) com uma resistência à tração de 2100 MPa, superplastificante (ViscoCrete 3006) com uma densidade 1050 kg/m^3 que é constituído por polycarboxilatos modificados em base aquosa (SIKA), estabilizador VP 1 (SIKA), areia com uma massa volúmica de 2630 kg/m^3 , com $d_{\text{máx.}}=1\text{mm}$ (CONCREMAT) e água. Os materiais apresentados podem ser observados na Figura 4.7.

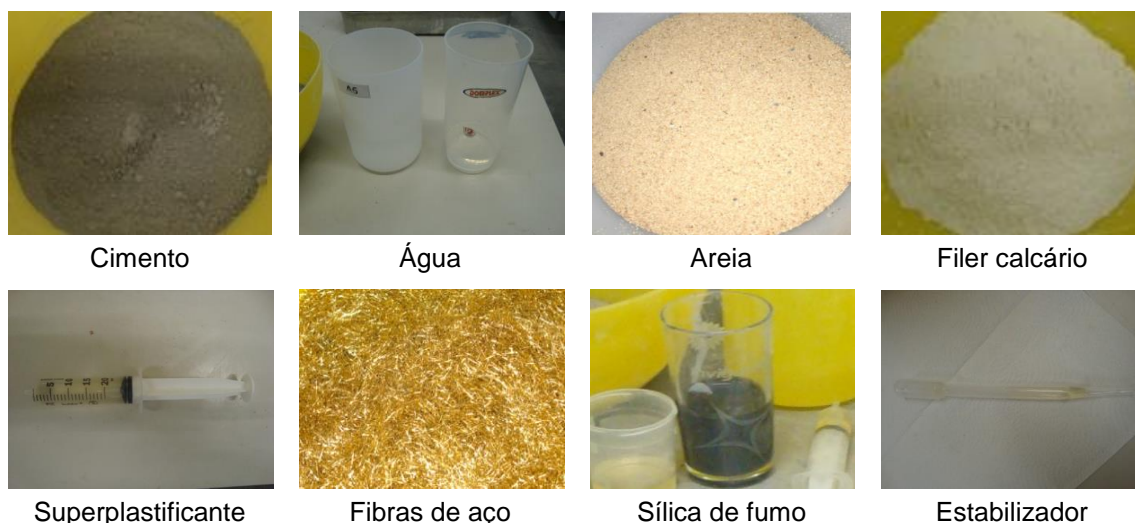


Figura 4.7 – Materiais constituintes das amassaduras.

4.5.1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

A água utilizada na fabricação das amassaduras, foi proveniente da torneira do LABEST, era armazenada no laboratório em garrações de 5 litros pelo menos 24 horas antes da fabricação. Assim conseguia-se que a temperatura da água fosse a mesma para todas as amassaduras uma vez que a temperatura do laboratório era praticamente constante ($20 \pm 2^\circ\text{C}$).

As partículas de sílica de fumo usadas possuíam uma forma perfeitamente esférica e com dimensões 50 a 100 vezes inferiores ao tamanho das partículas de cimento, com cor cinza e fornecida em solução aquosa [27].

Nos quadros seguintes são apresentadas as características dos restantes materiais utilizados na fabricação das amassaduras.

Quadro 4.1 – Características do cimento CEM I 42,5R fornecido pela SECIL [25].

Ensaio Mecânico (MPa)		Ensaio Químico (% mássica)		Ensaio físico	
Res. à flexão 2 dias	6.1	SiO ₂	19.82	Massa Volúmica	3160 kg/m ³
		Al ₂ O ₃	4.22		
Res. à flexão 7 dias	7.8	Fe ₂ O ₃	3.40	Superfície específica	4112 kg/m ³
		CaO total	62.66		
Res. à flexão 28 dias	8.9	MgO	2.21	Resíduo 45 µm	2 % mássica
		SO ₃	3.47		
Res. à compressão 2 dias	33.4	Perda ao fogo	3.0	Água na pasta normal	28.7 % mássica
Res. à compressão 7 dias	46.6	Cloreto	0.03	Tempo de início de presa	127 min
Res. à compressão 28 dias	58.1	Cal livre	1.28	Tempo de fim de presa	162 min
		Resíduo insolúvel	1.1		

Quadro 4.2 – Características do filler calcário fornecido pela Comital [25].

Ensaio Químico (%)		Ensaio Físico	
CaCO ₃	99	Massa volúmica	2680 kg/m ³
MgCO ₃	0.3	Densidade aparente	900 kg/m ³
Fe ₂ O ₃	0.002	Teor de humidade	0.1 %
Solúvel em HCl	0.2	Azul de Metileno	0.06 g/ 100 g
Sulfatos solúveis em ácido	< 0.05	Partículas < 2mm	100 %
Cloreto	< 0.001	Partículas < 125 µm	99 %
Enxofre total	< 0.04	Partículas < 63 µm	85 %

Quadro 4.3 – Características das fibras de aço utilizadas [25].

Nome	Resistência à tração (MPa)	lf (mm)	df (mm)	lf/df
KrampeHarex DM	2100	6	0.175	34
		9	0.175	51
		12	0.175	69

Em que:

lf – Comprimento da fibra;

df – Diâmetro da fibra e

lf/df – Relação comprimento/diâmetro da fibra.

Quadro 4.4 – Características do superplastificante fornecido pela Sika [28].

Sika Viscocrete 3006	
Base química	Policarboxilatos modificados em base aquosa
Aspeto	Amarelo claro
Massa volúmica ($23 \pm 2^\circ\text{C}$)	$1050 \pm 20 \text{ kg/m}^3$
pH ($23 \pm 2^\circ\text{C}$)	4.5 ± 1.0
Teor de sólidos	$18.0 \pm 1.8 \%$
Teor em iões cloreto	$< 0.1 \%$

Na Figura 4.8 é possível observar a curva granulométrica da areia utilizada na produção das amassaduras, determinada segundo a Norma Portuguesa NP EN 933-1: 2000 [29] realizada no LABEST.

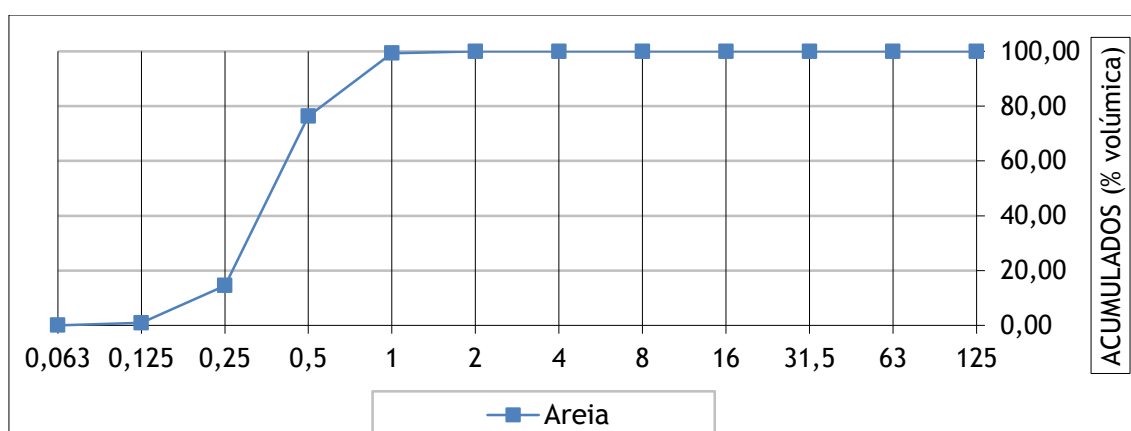


Figura 4.8 – Curva granulométrica da areia utilizada nas amassaduras.

4.6. PROVETES PRISMÁTICOS

Para se realizar a produção dos provetes prismáticos que foram sujeitos a ensaios não destrutivos (resistividade e ultrassons) e a ensaios destrutivos (tração indireta por flexão e compressão) houve necessidade de se proceder à preparação dos seus moldes. Tendo em conta que já existiam moldes metálicos disponíveis no LABEST foram estes os utilizados para a produção dos provetes prismáticos com 40 mm de largura, 40 mm de altura e 160 mm de comprimento. O procedimento adotado foi o seguinte:

1. Recolheram-se e limparam-se as peças constituintes do molde e procedeu-se à respetiva montagem;
2. Pincelaram-se as paredes internas e a base do molde com óleo descofrante;
3. Colocaram-se redes metálicas com 40 mm de largura e 60 mm de altura nos topos do molde (Figura 4.9 (b));
4. Verteu-se a pasta ou argamassa para o molde, e neste momento vibrou-se a rede metálica para permitir a passagem dos finos (Figura 4.9 (c));
5. Depois de encher os moldes colocou-se uma folha de acetato sobre o respetivo molde de maneira a evitar a evaporação da água da pasta ou argamassa.

Na Figura 4.9 é possível visualizar o molde utilizado.

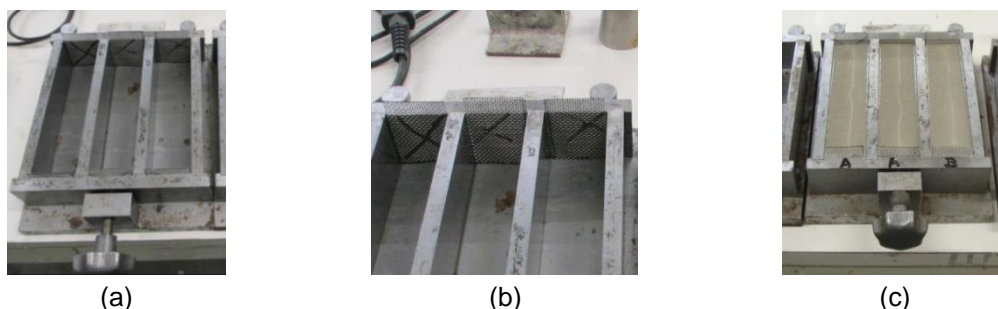


Figura 4.9 – Molde para a fabrico dos provetes prismáticos: (a) molde montado; (b) redes metálicas; (c) molde com pasta ou argamassa.

4.7. TEMPERATURA

A medição de temperatura da pasta ou argamassa ao longo deste trabalho experimental foi realizada em duas situações: no exato momento em que se concluiu a sua produção e ao longo das primeiras 48 horas da hidratação do cimento. Foi também registada a temperatura ambiente e humidade relativa, tanto na sala de produção como na sala de ensaios.

4.7.1. TEMPERATURA NA SALA DE PRODUÇÃO E DE ENSAIO

Na sala de produção a temperatura ambiente e a humidade relativa foi medida com recurso ao higrómetro (2), a fim de perceber as condições em que foram fabricadas as diferentes amassaduras. Na sala de ensaios a temperatura e humidade foi medida com recurso a um higrómetro (1), a fim de se conhecerem as condições na realização do ensaio de Vicat. Na Figura 4.10 é possível observar os equipamentos supracitados.



Higrómetro (1)



Higrómetro (2)

Figura 4.10 – Equipamentos de medição de temperatura e humidade utilizados ao longo dos ensaios.

Na sala de ensaios optou-se por colocar, também, um detetor térmico (PT 100) com o intuito de registar a evolução da temperatura ambiente ao longo das primeiras 48h de hidratação do cimento. Desta forma foi possível em alguns casos isolar o efeito que a temperatura ambiente poderia ter sobre o molde e por sua vez sobre a hidratação do cimento. Posteriormente, com o intuito de obter temperaturas ambiente mais estáveis, optou-se por recorrer ao detetor térmico implantado na base do molde HC1.

4.7.2. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DA PASTA OU ARGAMASSA NA PRODUÇÃO

Após a conclusão da produção da pasta ou argamassa, com esta ainda no recipiente da misturadora, a temperatura foi medida e registada através de um termómetro de infra-vermelhos que é possível observar na Figura 4.11 e serviu como primeira fase de controlo de temperatura da pasta ou argamassa.



Figura 4.11 – Termómetro de infra-vermelhos.

Este equipamento também foi utilizado para medir a temperatura da pasta ou argamassa no ensaio de espalhamento.

Na produção do primeiro provete serviu para verificar se o valor da temperatura registado na base do molde pelo detetor térmico estava em consonância com o valor de temperatura apresentado pelo termómetro de infra-vermelhos medido à superfície da pasta ou argamassa no topo do molde.

4.7.3. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA NO MOLDE NAS PRIMEIRAS 48 HORAS

Após o fecho do molde de ensaio fez-se a ligação do detetor térmico do molde ao Datataker DT 505, que já se encontrava ligado ao computador (Figura 4.12), dando-se início ao registo da

evolução da temperatura durante as primeiras 48 horas de hidratação do cimento. O valor da temperatura foi registado e gravado de minuto a minuto, obtendo no final, cerca de 3000 registos de temperatura referente a cada provete ensaiado.



Figura 4.12 – Sistema de ensaio para medição de temperatura: (a) computador portátil; (b) Datataker DT 505; (c) fios de ligação do detetor térmico do molde ao Datataker DT 505.

4.8. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Antes de enumerar o procedimento de ensaio, existem algumas considerações a ter em atenção, que estiveram na base do procedimento adotado.

O método utilizado para a avaliação da resistividade elétrica, neste trabalho experimental, foi a técnica dos dois eléctrodos. Esta técnica permite a utilização de dois tipos de corrente: corrente alternada e corrente contínua. Segundo alguns autores as medições em corrente contínua não são recomendáveis devido ao efeito de induzir a polarização dos eléctrodos, traduzindo-se em erros significativos.

A corrente alternada é uma corrente elétrica que varia com o tempo, contrariamente à corrente contínua, cujo sentido permanece constante no tempo. A forma da onda da corrente alternada é sinusoidal (Figura 4.13) e é considerada a transmissão de onda de energia mais eficiente. A corrente alternada é constituída por fases, enquanto a corrente contínua é constituída pelo polo positivo e polo negativo [12]. Como tal, optou-se por utilizar uma corrente alternada neste estudo experimental.

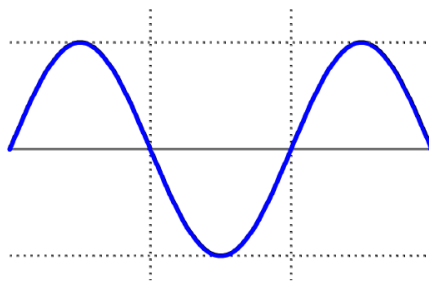


Figura 4.13 – Forma da onda em corrente alternada [12].

Dos equipamentos utilizados para a medição da resistividade contemplava um gerador de sinal 3390 50 Hz Arbitrary Waveform Generator da Keithley (Figura 4.14 (a)) e dois multímetros. Um multímetro DMM 4020 da Tektronix (Figura 4.14 (b)), registava a medição da intensidade da corrente elétrica e o multímetro 2700 Multimeter / Data Acquisition System da Keithley (Figura 4.14 (c)) registava a medição da diferença de potencial. O gerador de sinal permite gerar cinco tipos de onda diferentes (*SIN*, *SQUARE*, *RAMP*, *PULSE* e *NOISE*), permite variar a voltagem de 0.001 até 10 Volts e variar a frequência desde 1 a 1000000 Hertz. Após efetuar uma pesquisa sobre o estado de arte, decidiu-se realizar este estudo experimental com um tipo de onda SIN, uma voltagem de 10 V e uma frequência de 100 Hz [12].

Gerador de sinal da
Generator.

Multímetro da Tektronix.



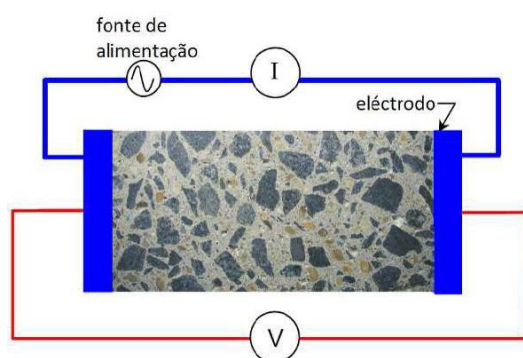
Multímetro da Keithley.

Figura 4.14 – Equipamentos utilizados no ensaio de resistividade.

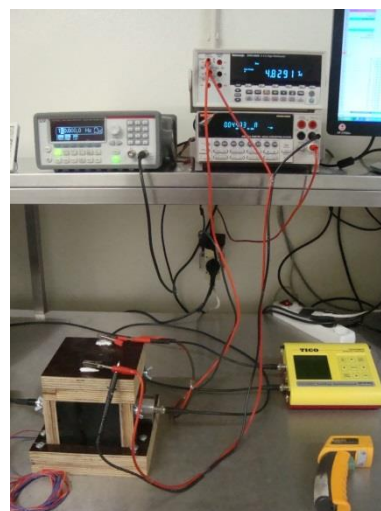
Esta decisão vai ao encontro de estudos experimentais desenvolvidos no LABEST que demonstraram que se os elétrodos estiverem embebidos na pasta ou argamassa, a frequência de 100 Hz, tem boa reprodutibilidade nos resultados, quer em provetes de betão quer em provetes de argamassas [12].

Tendo em conta as considerações anteriores o procedimento para a avaliação da resistividade foi o seguinte:

1. Ligaram-se os três equipamentos, representados na Figura 4.14, e montou-se o esquema de ensaio de acordo com a Figura 4.15;
2. No gerador de sinal selecionou-se a onda do tipo SIN, voltagem de ± 10 V e uma frequência de aquisição do sinal de 100 Hz;
3. Fixaram-se as garras de medição nas redes metálicas do provete em estudo e registou-se numa folha em Excel, a intensidade de corrente (Amperes) e a diferença de potencial (Volts) da seguinte forma:
 - a. O mais cedo possível após a fabricação da pasta ou argamassa;
 - b. De 30 em 30 minutos até 4 horas;
 - c. De 60 em 60 minutos até 48 horas;
 - d. Aos 7, 14, 21 e 28 dias.



(a)



(b)

Figura 4.15 – (a) Representação esquemática [16] e (b) sistema de ensaio da medição da resistividade elétrica pelo método dos dois elétrodos.

Tendo em conta que a aquisição e registo dos valores de intensidade de corrente e diferença de potencial era feita pela ação do operador (em regime discreto) e tendo o conhecimento de que a maior evolução da resistividade se processa nas primeiras horas, fica assim justificada a periodicidade de registo destas duas grandezas.

4.8.1. ESTUDO DE SENSIBILIDADE

Neste trabalho experimental também se procurou avaliar qual a influência do tipo de sinal, valor de voltagem e valor de aquisição de frequência na medição da resistividade, em corrente alternada. Para isso procedeu-se ao registo do valor de intensidade de corrente e diferença de potencial à 1, 4, 7, 24, 30 e 48 horas de idade das amassadura e fazia-se variar o tipo de sinal, o valor de voltagem e o valor de aquisição de frequência de acordo com os seguintes quadros:

Quadro 4.5 – Estudo do tipo de sinal.

Sinal	SIN	SQUARE	RAMP	PULSE	NOISE
Voltagem	10 V				
Frequência	100 Hz				

Quadro 4.6 – Estudo de voltagem.

Voltagem (V)	0.01	0.1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequência	100 Hz											
Sinal	SIN											

Quadro 4.7 – Estudo da frequência.

Frequência (Hz)	1	10	50	100	200	500	1000	5000	1×10^4	5×10^4	1×10^5	5×10^5	1×10^6
Sinal	SIN												
Voltagem	10 V												

4.9. ULTRASSONS

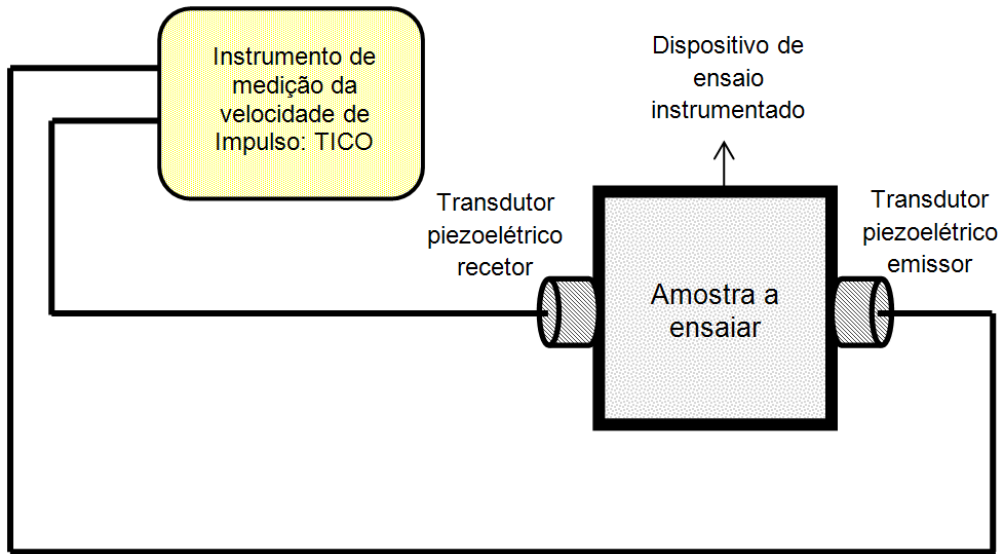
Para a realização dos ensaios de ultrassons teve-se em conta as características do equipamento, pelo que ao longo do ensaio procedia-se da seguinte forma:

1. Calibrou-se o aparelho;
2. Procedeu-se à colocação de um gel acoplante na superfície dos transdutores piezoelétricos que ficavam em pleno contacto com a amostra a ensaiar;
3. Colocaram-se os transdutores no orifício das faces do molde e, em contacto com as chapas, pressionou-se o suficiente para homogeneizar o gel na superfície do transdutor e libertar as bolhas de ar que ficavam alojadas entre as duas superfícies;
4. Iniciou-se a medição e registaram-se quatro valores de velocidade de ultrassons da seguinte forma:
 - a. O mais cedo possível após a fabricação da pasta ou argamassa,
 - b. De 30 em 30 minutos até 4 horas;
 - c. De 60 em 60 minutos até 48 horas;
 - d. Aos 7, 14, 21 e 28 dias.
5. Retiraram-se os transdutores piezoelétricos e procedeu-se à sua limpeza;

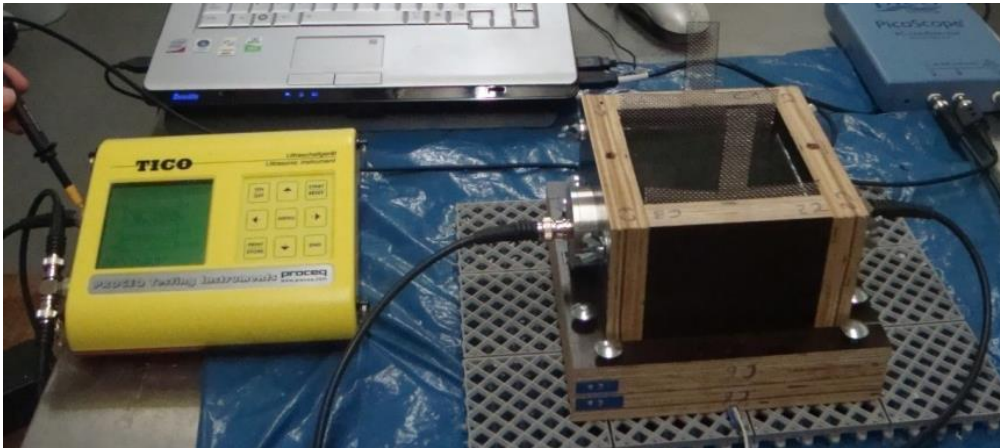
Para análise de resultados seleccionou-se o menor valor dos quatro registos efetuados, pois esse valor está associado ao valor mínimo de tempo de percurso obtido nesse ensaio.

Tendo em conta que a aquisição e registo dos valores da velocidade de ultrassons foi feita pela ação do operador (em regime discreto) e tendo o conhecimento de que a maior evolução dos ultrassons se processa nas primeiras horas, fica assim justificada a periodicidade de registo adotada.

Na Figura 4.16 é possível observar um diagrama esquemático e uma imagem do sistema de ensaio para medição de ultrassons.



(a)



(b)

Figura 4.16 – Representação esquemática do ensaio de ultrassons(a) e uma fotografia do mesmo (b).

4.10. SISTEMA EXPERIMENTAL

Na Figura 4.17 é possível observar a configuração do sistema de ensaio experimental usado na avaliação da hidratação do cimento durante as primeiras 48 horas. O ensaio experimental era constituído por um detetor térmico PT 100 (A), um Datataker DT 505 (B), 4 moldes instrumentados (C), um dispositivo ultrassónico TICO (D), um computador portátil (E), um gerador de sinal 3390 50Hz Arbitrary Waveform Generator da Keithley (F), um multímetro 2700 Multimeter Data Acquisition System da Keithley (G), um multímetro 2700 Multimeter Data Acquisition System da Keithley (H) e um computador fixo (I).

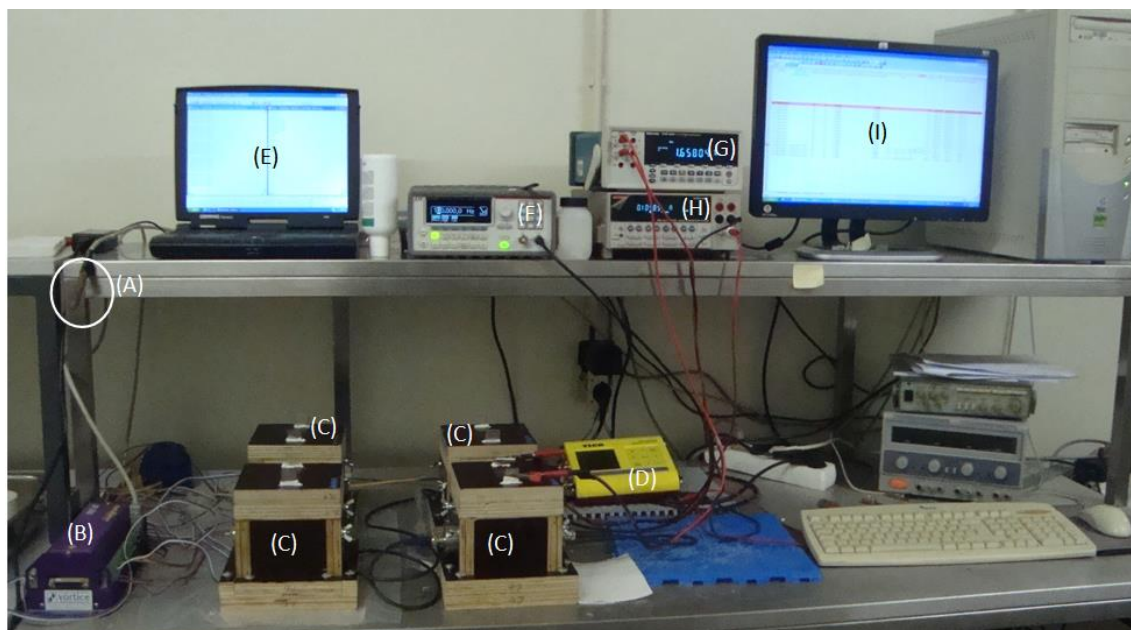


Figura 4.17 – Sistema experimental.

4.11. ENSAIO DE ESPALHAMENTO

Como não existem normas técnicas padronizadas para o ensaio de espalhamento para pastas e argamassas, no âmbito deste trabalho foi utilizada uma versão reduzida do ensaio de espalhamento com recurso a um mini-cone de Kantro (daqui em diante, designado como mini-cone de pastas) para medição em pastas e a um molde tronco-cónico para medição em argamassas, na Figura 4.18 observam-se as suas dimensões.

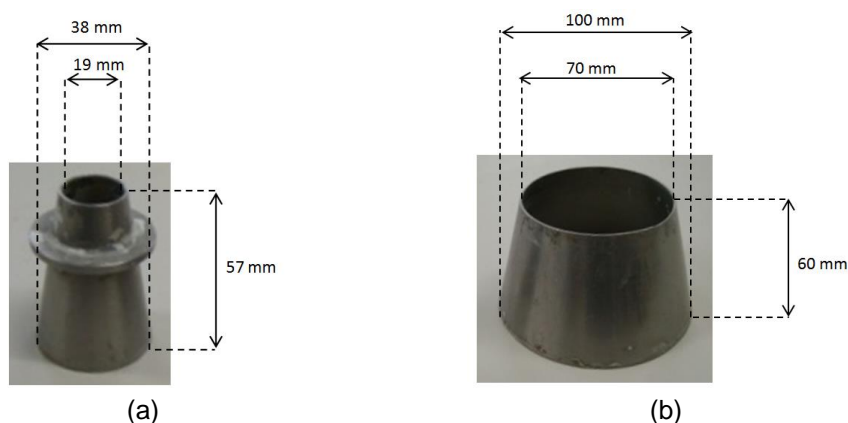


Figura 4.18 – Dimensões do: (a) mini-cone para pastas; (b) molde tronco-cónico para argamassas.

Em relação ao mini-cone de pastas seguiram-se os princípios descritos no estudo de Kantro [23]. Deste modo o procedimento adotado foi o seguinte:

1. Colocou-se o mini-cone, Figura 4.19 (b), para pastas ou o molde tronco-cónico, Figura 4.19 (c), para argamassas sobre uma superfície lisa, limpa, plana e nivelada;
2. Colocou-se a pasta ou argamassa no mini-cone (Figura 4.19 (a)) ou no molde tronco-cónico numa só fase e sem qualquer compactação;

3. Rasou-se a superfície superior do mini-cone ou molde tronco-cónico para que ficasse bem preenchido;
4. Caso existisse, removia-se o excesso de pasta ou argamassa derramada sobre a superfície;
5. Levantou-se, na vertical, o mini-cone ou o molde tronco-cónico de forma cuidadosa e uniforme, de modo a não perturbar o escoamento do material (Figura 4.19 (b));
6. Findo o espalhamento, mediram-se e registaram-se os diâmetros ortogonais¹ (Figura 4.19 (d));

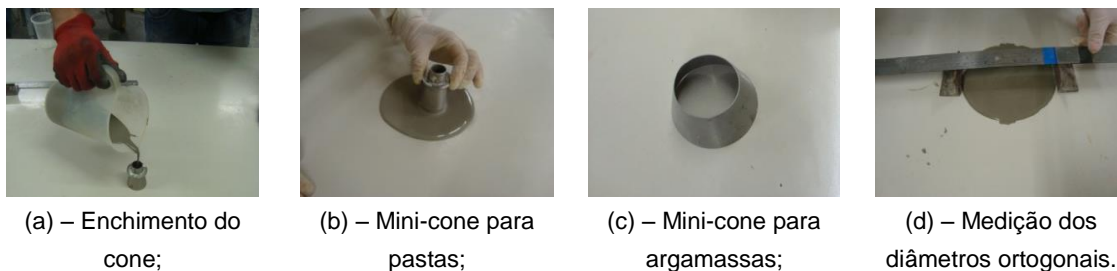


Figura 4.19 – Procedimento do ensaio de espalhamento.

4.12. ENSAIO DE VICAT

Tal como foi referido no estado da arte o ensaio de Vicat é importante para determinação do tempo de início e fim de presa de pastas de cimento. Tendo em conta que existe um procedimento normalizado NP EN 196-3: 2006 [26] na realização deste tipo de ensaio seguiu-se o procedimento descrito na referida norma.

4.13. DESMOLDAGEM E ARMAZENAMENTO DE PROVETES

Ao fim de 48 horas os provetes cúbicos foram desmoldados. O procedimento para o desmolde dos provetes cúbicos (Figura 4.20) era o seguinte:

1. Desligou-se o cabo do detetor térmico que estava ligado ao Datataker DT 505;
2. Recolheram-se os detetores piezoelétricos e as garras do ensaio de resistividade;
3. Transportou-se o molde instrumentado para a sala de produção;
4. Retirou-se o papel de isolamento dos orifícios da tampa;
5. Retirou-se a tampa, a “escora” e a folha de acetato;
6. Retiraram-se as peças delimitadoras da base;
7. Desenroscaram-se as porcas de orelhas e desencaixaram-se as faces do molde, de forma cuidada para evitar o desprendimento das chapas metálicas que se encontravam fixas à pasta ou argamassa;
8. Desprendeu-se o provete cúbico, de 100 mm de aresta, da base do molde instrumentado.
9. Sujeitou-se, novamente, o provete desmoldado aos ensaios de resistividade e ultrassons;
10. Transportou-se o provete para a câmara de armazenamento e foi submerso em água ao longo de 28 dias.

¹ Quando a olho-nu a forma do espalhamento não era circular, repetia-se novamente o ensaio, se se continuasse a observar um espalhamento mais elíptico, registava-se o diâmetro mais curto.

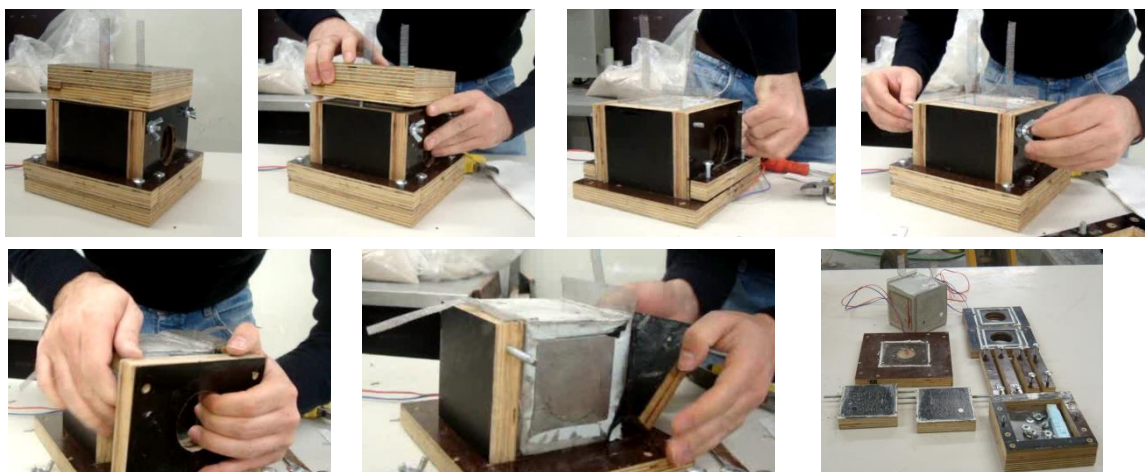


Figura 4.20 – Fases de desmoldagem do provete cúbico.

A câmara de armazenamento encontrava-se a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e uma humidade relativa superior a 95%. Na Figura 4.21 é possível observar as condições de armazenamento dos provetes imersos em água.



Figura 4.21 – Condições de armazenamento dos provetes.

4.14. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA POR FLEXÃO E À COMPRESSÃO

Para a determinação das tensões de rotura à tração e à compressão foi fabricado um único provete prismático, com dimensões de 40 mm de altura, 40 mm de largura e 160 mm de comprimento, representativo de cada mistura, devido à limitação de capacidade de produção da misturadora. Pelo facto de haver apenas um provete prismático de cada mistura, isto pode conduzir-nos a resultados pouco representativos da resistência de cada mistura. No entanto, os resultados obtidos podem vir a revelar-se indicadores da mistura que tem um melhor comportamento mecânico. Os provetes foram conservados nas mesmas condições de cura que os provetes cúbicos.

Para determinação do valor de resistência à tração, recorreu-se ao ensaio de flexão descrito na norma NP EN 196-1 2006 [30], este foi efetuado sob três pontos conforme Figura 4.22 e consistiu na aplicação de uma carga vertical a meio vão até à rotura e calculou-se a resistência máxima à flexão (R_f) pela seguinte fórmula:

$$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times L}{b^3} \quad 4.1$$

Em que:

R_f - resistência à flexão (MPa);

b - lado da seção quadrada do prisma (milímetros);

F_f - carga aplicada ao centro do prisma na rotura (Newton);

L - distância entre apoios (milímetros);

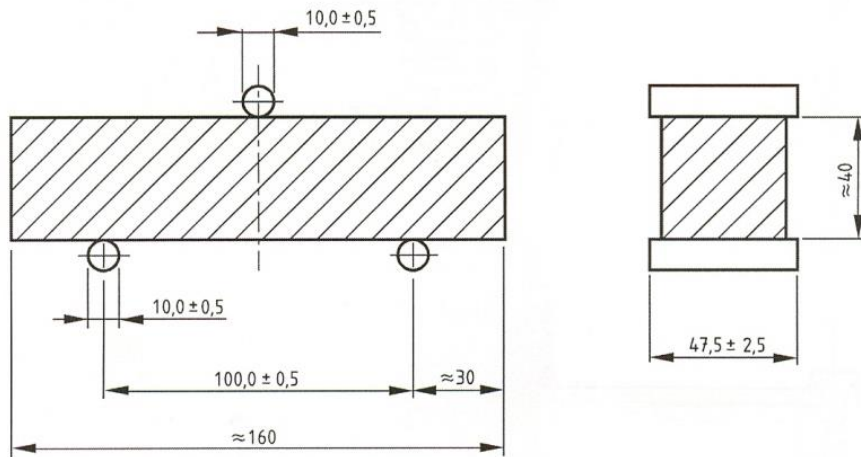


Figura 4.22 – Dispositivo de carga para a determinação da resistência à flexão (distâncias em mm) [30].

Para a realização do ensaio à compressão nos meios prismas resultantes do ensaio anterior foi aplicada uma carga gradualmente crescente até à rotura do provete, registrando-se a força máxima de rotura por compressão.

A resistência à compressão é dada por:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad 4.2$$

Em que:

R_c - resistência à compressão (MPa)

F_c - carga máxima na rotura (N)

1600 - área dos pratos ou das placas auxiliares (40 × 40) (milímetros)

Na Figura 4.23 é possível observar, a nível exemplificativo, o ensaio de tração indireta por flexão e o ensaio de resistência à compressão em provetes prismáticos.



5

ESTUDO PRELIMINAR

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é identificada a mistura de referência usada para avaliar a reprodutibilidade dos moldes instrumentados desenvolvidos ao longo deste trabalho experimental, com o intuito de se avaliar a evolução da hidratação do cimento ao longo das primeiras 48 horas. Para esse efeito, foi registrada a evolução da temperatura, da resistividade e ultrassons em nove provetes.

No ponto 5.2 será apresentada a constituição da mistura de referência e identificados os provetes e respectivas amassaduras. Serão apresentados os resultados dos ensaios de espalhamento efetuados para cada amassadura e analisada a influência do tipo de sinal, valor de voltagem e valor de frequência do sinal na medição da resistividade, em corrente alternada.

No ponto 5.3 são apresentados os resultados obtidos com o molde instrumentado HC1. Devido aos problemas manifestados na utilização deste molde, houve necessidade de conceber um novo molde, o HC2.

No ponto 5.4 são apresentados os resultados obtidos com o HC2 e comparados com os obtidos no HC1.

Visto que o molde HC2 apresentou reprodutibilidade de resultados, decidiu-se proceder à conceção de mais três moldes instrumentados iguais ao HC2, designados por HC2A, HC2B e HC2C, a fim de se avaliar a fiabilidade dos resultados obtidos pelos quatro moldes. Estes resultados podem ser visualizados no ponto 5.5.

Nesta fase do estudo experimental, foram realizados ensaios de espalhamento para cada pasta ensaiada, sendo apresentados os seus resultados no ponto 5.6.

5.2. MISTURAS, PASTAS E ARGAMASSAS

Para avaliar a capacidade de reprodutibilidade do molde HC1 na evolução da hidratação do cimento ao longo das primeiras 48 horas, foi desenvolvida uma pasta de cimento de referência (M1) com a constituição apresentada no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Constituição da mistura M1.

Mistura	Constituintes (kg/m ³)					w/c
	CEM	FC	Sp	Ag1	Ag2	
M1	1092,0	491,3	20,7	358,0	89,3	0,40

Em que:

CEM – Cimento;

FC – Filler calcário;

Sp – Superplastificante;

Ag1 – Cerca de 80% da água total;

Ag2 – Cerca de 20% da água total;

w/c – Razão água/cimento

Esta mistura de referência foi realizada várias vezes, dando origem a várias amassaduras diferentes que, por sua vez, originaram diferentes provetes. No Quadro 5.2, é possível visualizar as amassaduras e provetes que foram produzidas com a mistura M1, assim como a data e hora de fabrico.

Quadro 5.2 – Amassaduras e provetes produzidas com a mistura M1.

Proвете	Molde instrumentado	Mistura	Amassadura	Data e hora de fabrico
A1	HC1	M1	AM01	20-03-2013 10:15
A2	HC1	M1	AM02	26-03-2013 10:10
B1	HC2	M1	AM03	08-04-2013 11:13
B2	HC2	M1	AM04	11-04-2013 10:10
B3	HC2	M1	AM05	16-04-2013 10:40
C1	HC2	M1	AM06	30-04-2013 13:00
C2	HC2A	M1	AM07	30-04-2013 11:11
C3	HC2B	M1	AM08	30-04-2013 11:50
C4	HC2C	M1	AM09	30-04-2013 12:35

5.2.1. ESPALHAMENTO

Uma forma de aferir a reprodutibilidade da pasta de cimento de referência usada ao longo do estudo preliminar passou por executar um ensaio de espalhamento por cada amassadura. Além disso, também permitiu avaliar a trabalhabilidade da pasta de cimento de referência.

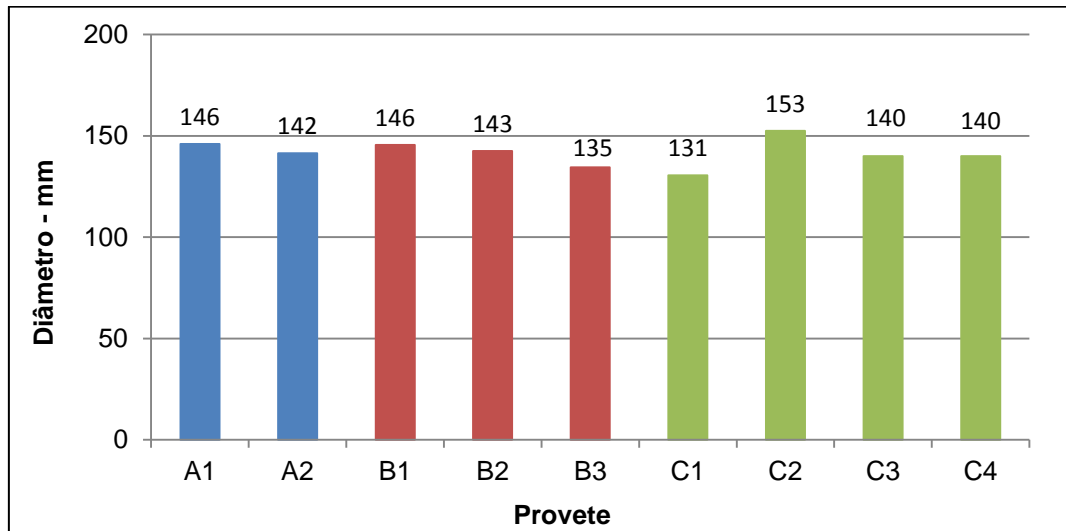


Figura 5.1 – Resultados dos ensaios de espalhamento do estudo preliminar.

Pela observação da Figura 5.1, percebe-se que a trabalhabilidade da pasta de cimento é praticamente a mesma ao longo do estudo preliminar e percebe-se que as diferentes amassaduras realizadas para reproduzir a mesma pasta de cimento, parece ter sido conseguida.

5.2.2. ANÁLISE DE RESISTIVIDADE AO SINAL

No início deste trabalho experimental procurou-se avaliar ao longo de 28 dias de cura das pastas, qual a influência do tipo de sinal, valor de voltagem e valor de frequência do sinal na medição da resistividade, em corrente alternada.

Para isso procedeu-se ao registo do valor de intensidade de corrente e diferença de potencial aos 0,1, 1, 2, 7, 14, 21 e 28 dias de idade das amassaduras e fez-se variar o tipo de sinal, o valor de voltagem e o valor de frequência do sinal. Na Figura 5.2 apresentam-se os resultados de variação com o tipo de sinal.

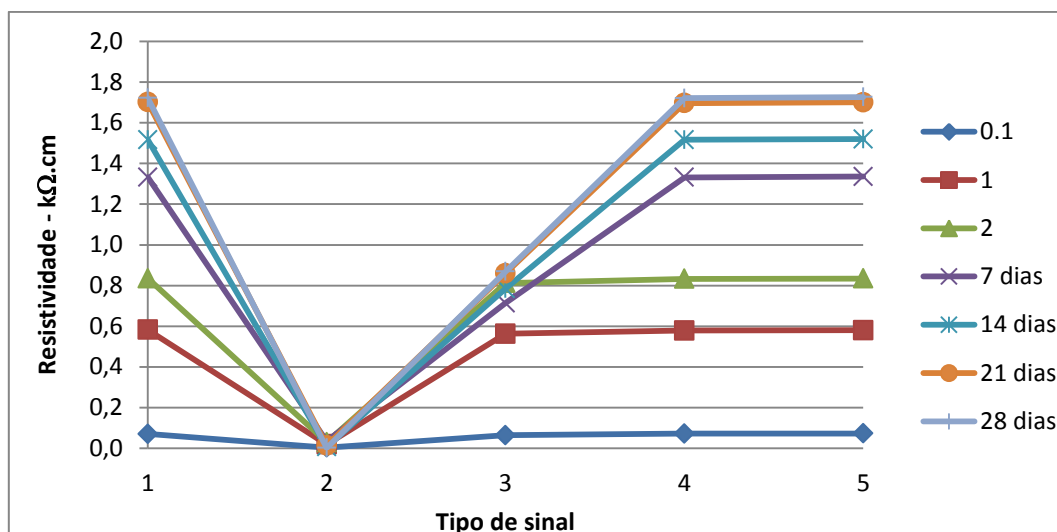


Figura 5.2 – Estudo do tipo de sinal na medição da resistividade elétrica.

Legenda do tipo de sinal: 1-SIN; 2-NOISE; 3-PULSE; 4-RAMP e 5-SQUARE,.

Da análise da Figura 5.2, para uma frequência de aquisição de 100 Hertz e uma voltagem de 10 Volts, constata-se que ao longo do tempo (desde os primeiros minutos até aos 28 dias de idade da pasta ou da argamassa) existe uma uniformidade nos valores obtidos da resistividade para os tipos de sinal SIN, RAMP E SQUARE enquanto que os tipos de sinal NOISE E PULSE não conseguem apresentar uma consistência na medição de valores ao longo dos 28 dias.

Conclui-se, então, que os sinais do tipo SIN, RAMP e SQUARE são os únicos que parecem apresentar condições para poderem ser usados na determinação da resistividade sem que haja perturbação na sua medição, desde os primeiros minutos de hidratação do cimento até aos 28 dias de cura da pasta de cimento.

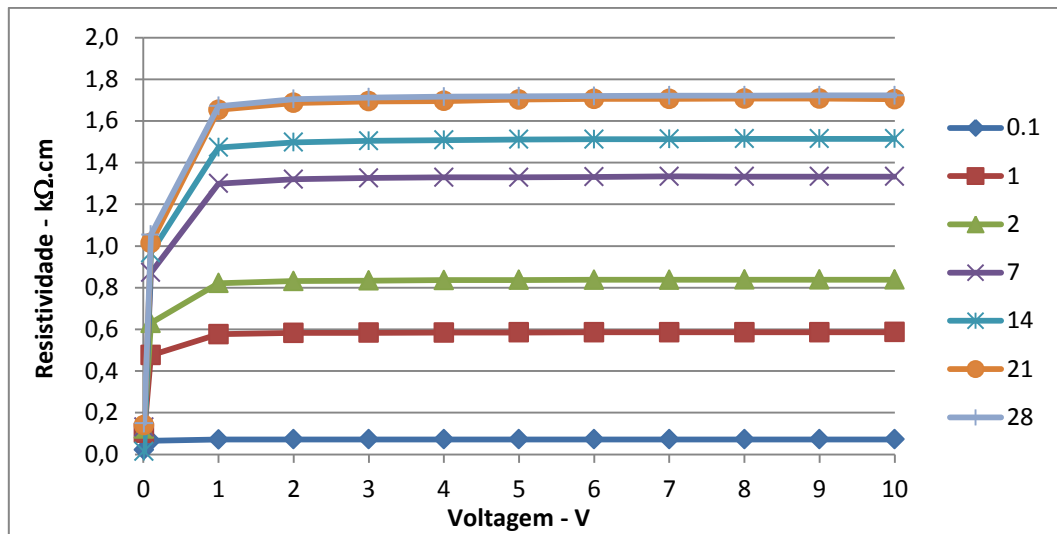


Figura 5.3 - Estudo do valor de voltagem na medição da resistividade elétrica.

Da análise da Figura 5.3, constata-se que para uma frequência de sinal de 100 Hertz e um sinal do tipo SIN, na medição de resistividade elétrica registrada ao longo de 28 dias, existe uma uniformidade nos valores obtidos para voltagens entre 2 e 10 Volts e, para voltagens de 0.01 e 0.1 Volts, os valores de resistividade são bastante inferiores quando comparados com os anteriores.

Isto parece indicar que, à medida que se dá o processo de hidratação do cimento e, a pasta ou argamassa, sofrem alterações na sua micro-estrutura, as voltagens de 0.01 e 0.1 Volts fornecem valores de resistividade cada vez mais díspares quando comparados com os restantes valores de voltagem.

Apesar do erro de medição de resistividade ser bastante menor com os apresentados para as voltagens de 0,01 e 0,1 Volts, o valor de voltagem de 1 Volt, parece apresentar o mesmo comportamento, à medida que aumenta a idade de cura, maior o erro na medição da resistividade elétrica.

Assim, para uma frequência de aquisição de 100 Hertz e um sinal do tipo SIN, constata-se que a gama de valores de voltagens situada entre 2 e 10 Volts, parece ser a mais adequada para a determinação da resistividade ao longo de 28 dias sem que haja perturbação na sua medição ao longo do tempo.

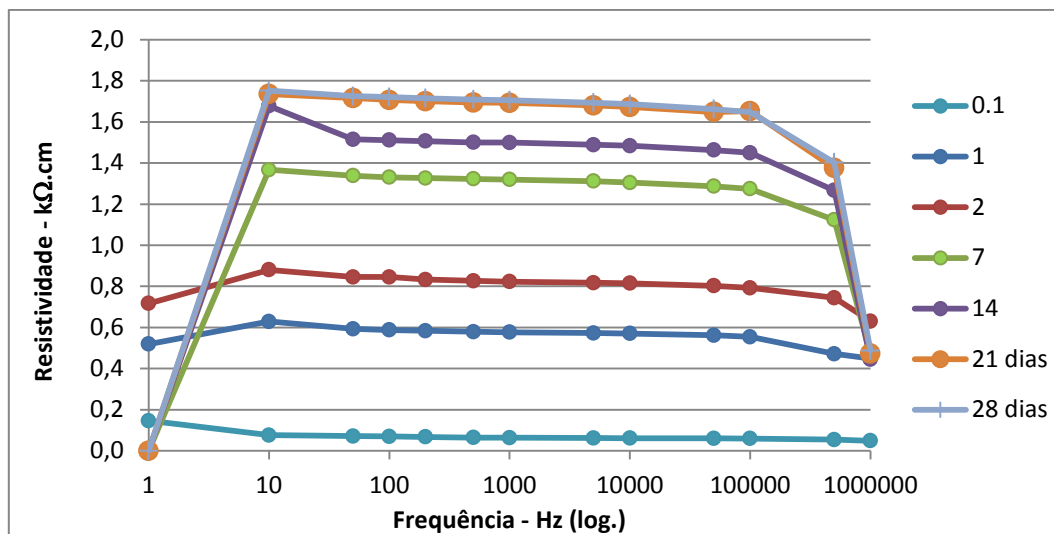


Figura 5.4 - Estudo do valor de frequência na medição da resistividade elétrica.

Na Figura 5.4 pode verificar-se que para uma voltagem de 10 Volts e um sinal do tipo SIN, os valores de resistividade apresentam alguma variação ao longo do tempo. Essa variabilidade é mais acentuada para a gama de valores situada entre 1 e 10 volts e entre os 100 KHz e 1 MHz. Apesar de também variar ao longo do tempo e mostrar uma tendência para haver uma diminuição dos valores de resistividade à medida que se aumenta o valor de frequência, essa diferença não é muito significativa e, portanto, podem ser considerados constantes.

Isto parece indicar que, à medida que se dá o processo de hidratação do cimento e, a pasta ou argamassa, sofrem alterações na sua micro-estrutura, a gama de valores situada entre 1 e 50 volts e entre os 100 KHz e 1 MHz deixam de ser as mais indicadas para conseguir atravessar os provetes sem que haja uma grande alteração do valor final de resistividade.

Conclui-se, então, que para uma voltagem de 10 Volts e um sinal do tipo SIN, a gama de valores de frequência situada entre 50 e 100 KHz parecem apresentar condições para poderem ser utilizados na determinação da resistividade sem que haja perturbação na sua medição, desde os primeiros minutos de hidratação do cimento até aos 28 dias de cura da pasta de cimento.

5.3. REPRODUTIBILIDADE DO MOLDE HC1

Os provetes usados para avaliar a reprodutibilidade do molde HC1 na evolução de vários parâmetros durante a hidratação do cimento ao longo das primeiras 48 horas, foi o A1 e o A2.

Na figura seguinte é possível visualizar a evolução da temperatura registada no molde HC1 para os dois provetes.

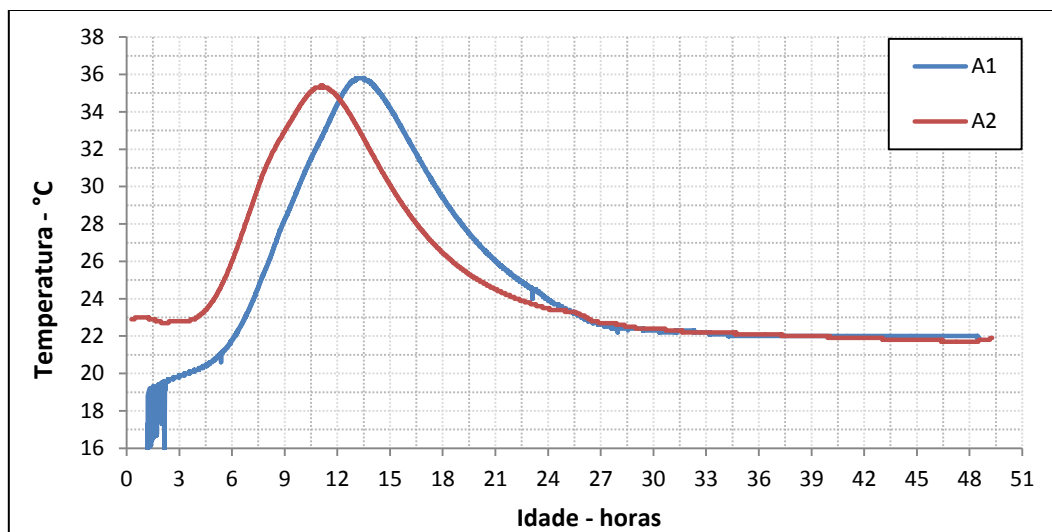


Figura 5.5 – Evolução da temperatura nas primeiras 48 h dos provetes A1 e A2.

Tal como se pode verificar na Figura 5.5, o andamento das curvas de temperatura registadas pelo detetor térmico na base do molde HC1 para o provete A1 e A2, é muito semelhante, poderíamos afirmar que a evolução da temperatura da hidratação do cimento seria praticamente igual se o valor máximo das respetivas curvas não estivesse desfasado em cerca de duas horas. O pico de temperatura é muito semelhante (Quadro 5.3) e, além disso, a temperatura no final das 48 horas para os dois provetes cúbicos, é praticamente igual.

Quadro 5.3 – Valores característicos das curvas de temperatura dos provetes A1 e A2.

Proвете	Temperatura máx (°C)	Idade (h)
A1	35,8	13,06
A2	35,4	11,03

No entanto, no início do ensaio do provete A1, a temperatura é bastante mais baixa quando comparada com a do provete A2. Esta diferença de temperaturas iniciais é atribuída ao facto do molde HC1, no momento da realização da primeira amassadura, não possuir estanqueidade suficiente e deixou escapar grandes quantidades de pasta, que ia sendo recuperada e reintroduzida no molde. Este facto fez com que a temperatura fosse diminuindo, atrasando o processo de hidratação e o pico de temperatura em cerca de 2 horas.

Outro aspeto que é facilmente observável é a instabilidade dos valores de temperatura do provete A1 nas primeiras 2 horas. A razão para ter havido essa instabilidade deveu-se ao facto de, nesse preciso momento, se ter feito um estudo de sensibilidade do tipo de sinal gerado, valor de voltagem e frequência de aquisição no estudo de resistividade. Sempre que se procedia desta forma, os valores de temperatura registados pelo detetor térmico eram destabilizados, por sinais com frequência elevada, superior a 1MHz. Na Figura 5.6 é apresentada a evolução da temperatura em pormenor nas primeiras 2 horas, onde é possível observar com maior clareza o efeito provocado pelo estudo de sensibilidade supracitado.

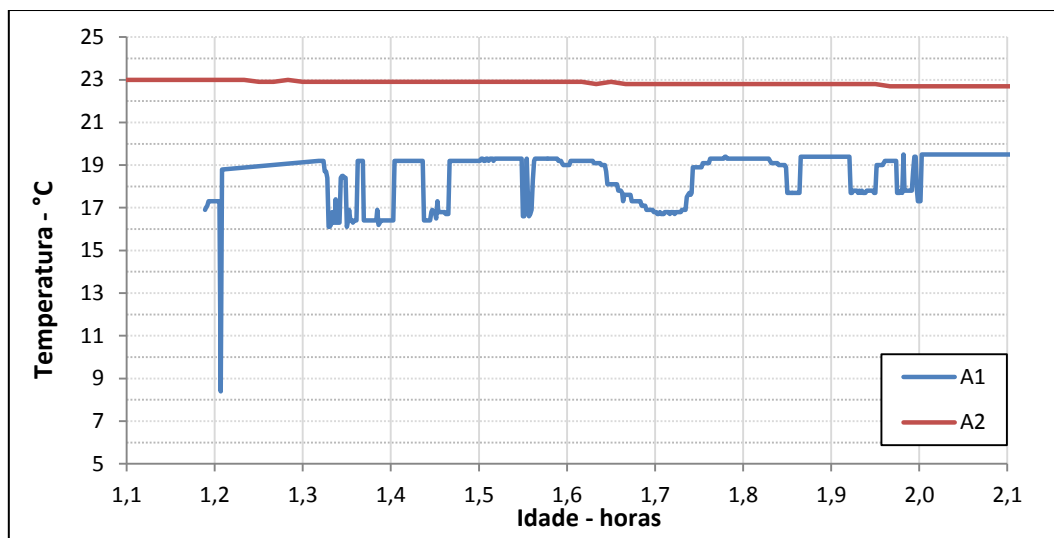


Figura 5.6 – Instabilidade dos valores de temperatura do provete A1 nas primeiras 2 horas.

Na Figura 5.7 apresenta-se a comparação entre os valores de temperatura na pasta de cimento obtidos através do detetor térmico PT 100 na base do molde HC1 e os obtidos através do termómetro de infravermelhos, medidos na pasta de cimento no topo do molde.

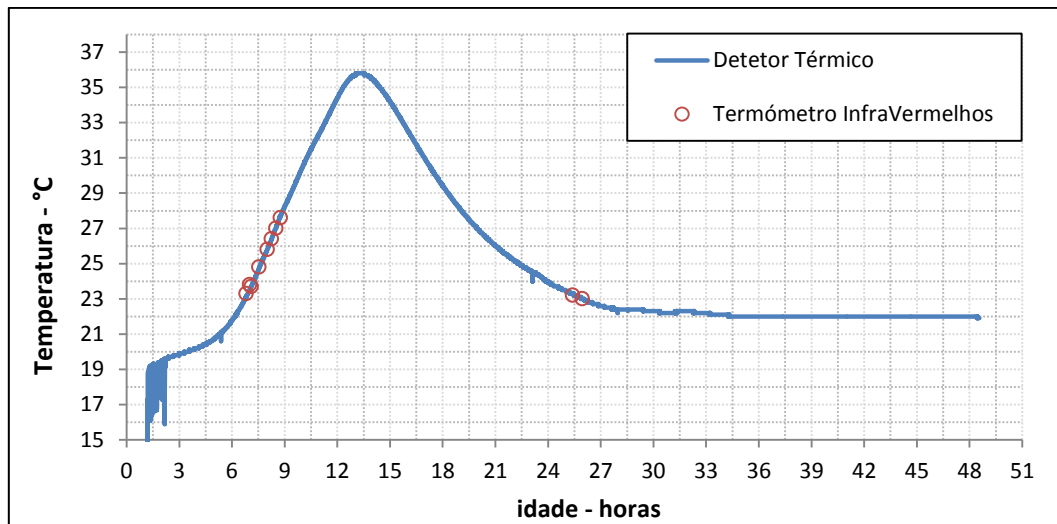


Figura 5.7 – Comparação entre temperatura via detetor térmico e termómetro infravermelhos no provete A1.

Do gráfico concluiu-se que havia uma boa correlação entre os dois meios de medição da temperatura, pelo que se considerou adequada a solução adotada para a medição da evolução da temperatura dentro do molde, deixando de haver necessidade estudar outro tipo de medição térmica ao longo das primeiras 48 horas.

Na Figura 5.8 é possível visualizar a evolução da resistividade nas primeiras 48 horas.

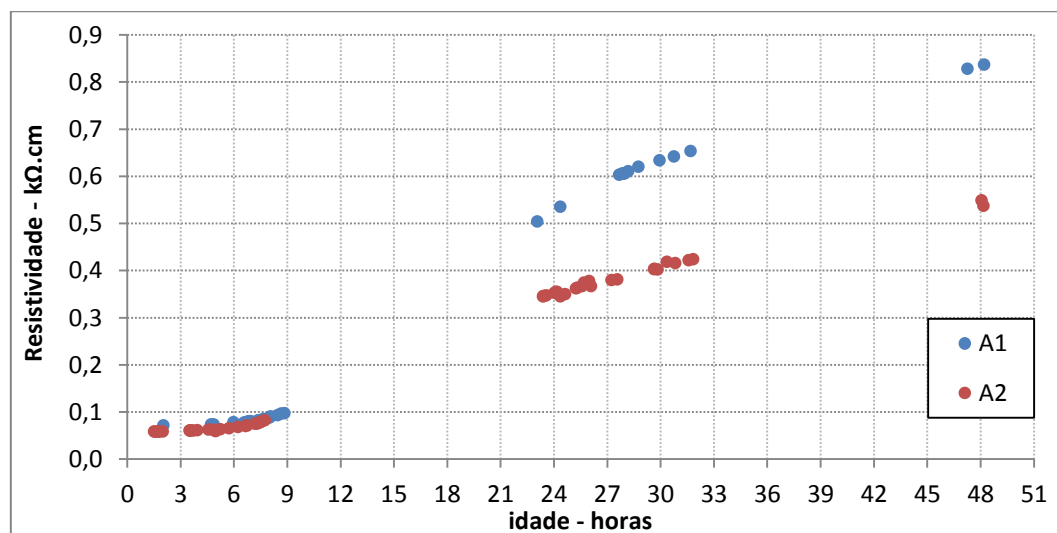


Figura 5.8 – Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes A1 e A2.

Da visualização do gráfico anterior, percebe-se que não existe grande semelhança no valor dos resultados obtidos ao fim de 48 horas. Apesar de não conseguir apresentar uma explicação plena para valores tão distintos de resistividade, tal efeito pode estar relacionado com o facto da pasta de cimento permanecer mais tempo no molde HC1 sem a colocação da tampa, e também pelo facto de não se ter colocado uma folha de acetato em cima da pasta, tal como se colocou no

provete A2, permitindo, dessa forma, a evaporação da água, fazendo com que a resistividade aumentasse ao fim de 48 horas.

De salientar que o interregno de pontos de resistividade nos intervalos entre as 9-24 horas e entre as 33-46 horas, se deve ao facto da medição ser feita em regime discreto e dependente da ação de um operador. Esta situação irá perpetuar-se ao longo de todos os ensaios.

Constata-se, também, que o método adotado para a medição de resistividade, consegue apresentar valores de resistividade desde o primeiro momento em que é efetuado, ou seja, em idades muito precoces permitindo assim apresentar uma boa descrição da evolução da resistividade ao longo das primeiras 48 horas.

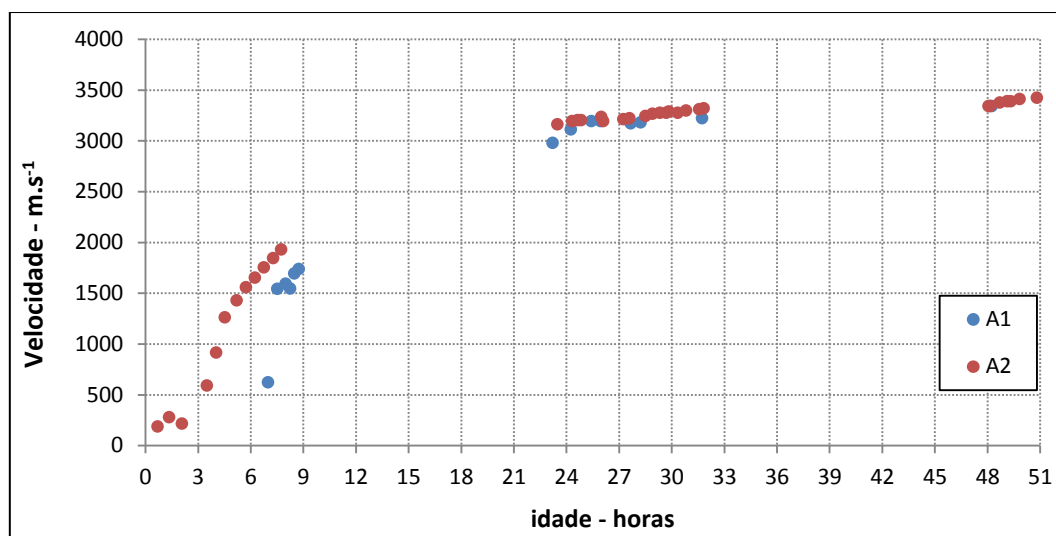


Figura 5.9 – Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons nas primeiras 48 horas dos provetes A1 e A2.

Da análise da Figura 5.9 e, ao contrário do gráfico de resistividade, os valores obtidos nos provetes A1 e A2 são semelhantes e no final das 48 horas chegam mesmo a sobrepor-se. Isto parece indicar que o método de ensaio de ultrassons não tem sensibilidade suficiente para conseguir identificar o diferente comportamento na evolução de hidratação de uma pasta em relação à outra, tal como registado pelo método de resistividade.

A evolução de ultrassons da Figura 5.9 segue a tendência que outros autores apresentaram noutros trabalhos semelhantes a este, nomeadamente, Naik et al [20]. Pois à medida que a pasta de cimento vai endurecendo ao longo do tempo, a velocidade de propagação de ultrassons tende a aumentar.

Constata-se, também, que a aquisição de valores de velocidade das ondas de ultrassons para o provete A1 é mais tardia do que no provete A2. Não se encontra uma resposta definitiva para este fenómeno, no entanto pode associar-se ao facto de haver um atraso na fase de hidratação do cimento e aparentemente a medição de ultrassons parece ter dificuldade em medir a velocidade de ondas em meios que não são puramente sólidos ou puramente líquidos.

Devido aos problemas manifestados na utilização deste molde, houve necessidade de conceber um novo molde, o HC2, e cujos resultados serão apresentados no ponto que se segue.

5.4. REPRODUTIBILIDADE DO MOLDE HC2

Os provetes usados para avaliar a reprodutibilidade do molde HC2 na evolução da hidratação do cimento ao longo das primeiras 48 horas, foram o B1, B2 e o B3. No gráfico seguinte é possível visualizar a evolução da temperatura registada no molde HC2 para os três provetes.

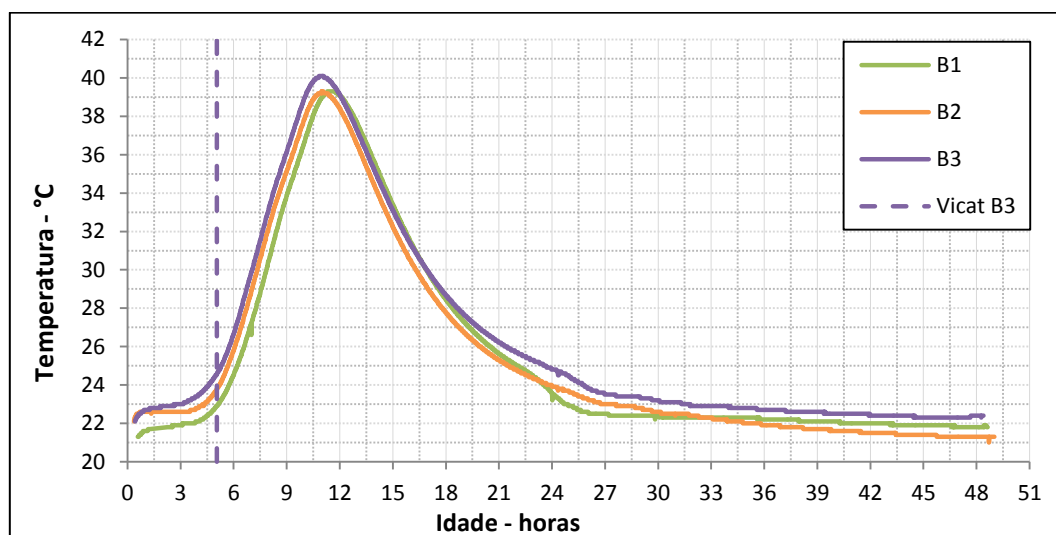


Figura 5.10 – Evolução da temperatura nas primeiras 48 h dos provetes B1, B2 e B3 e respetivo tempo de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.

Com base na Figura 5.10 pode constatar-se que para os três provetes, o pico de temperatura dá-se praticamente na mesma idade (cerca das 11 horas), pelo que as características do molde HC2 parecem permitir uma evolução da temperatura sem interferências, dado que é possível constatar no Quadro 5.4. Este facto, permite concluir que o molde HC2 oferece garantia de reprodutibilidade.

Quadro 5.4 - Valores característicos das curvas de temperatura dos provetes B1, B2 e B3.

Proвете	Temperatura máx. (°C)	Idade (h)
B1	39,3	11,3
B2	39,3	11,0
B3	40,1	10,8

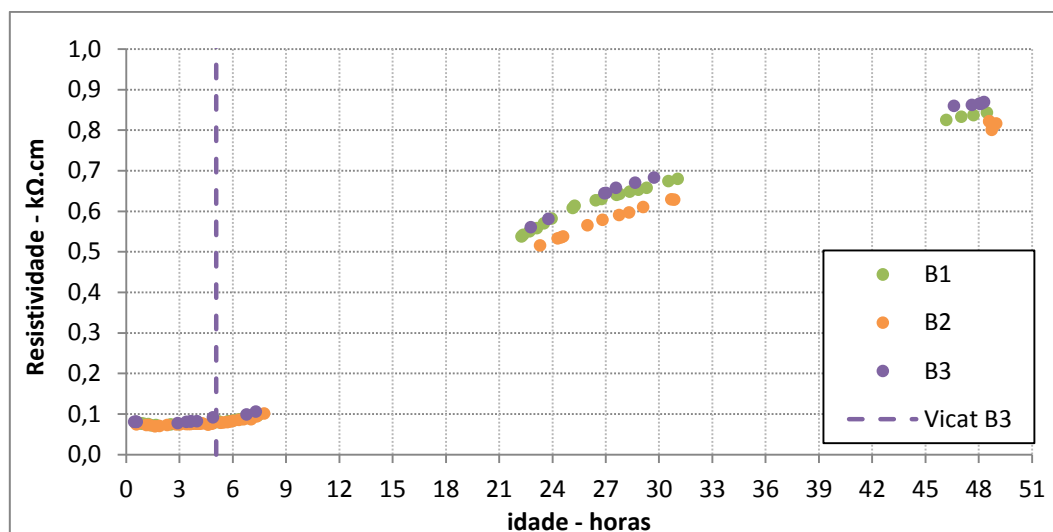


Figura 5.11 - Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes B1, B2 e B3 e respetivo tempo de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.

Conforme pode ser visualizado na Figura 5.11, os valores de resistividade registados, apresentam uma boa reprodutibilidade. Desde início do ensaio até cerca das 8 horas de idade das pastas de cimento, os valores de resistividade encontram-se sobrepostos. Entre as 21 e 32 horas, a tendência de evolução da resistividade dos três provetes é semelhante entre si e às 48 horas os valores de resistividade registados são muito próximos uns dos outros. Levando-nos a crer, que o molde HC2 consegue dar uma boa resposta na avaliação da evolução da resistividade nas primeiras idades.

Tal como aconteceu com o molde HC1, à medida que se vai desenvolvendo o processo de hidratação, os valores de resistividade elétrica tendem a aumentar. Se se comparar os valores resistividade elétrica obtidos pelos provetes B1, B2, B3 e A1, poderá afirmar-se que são praticamente equivalentes.

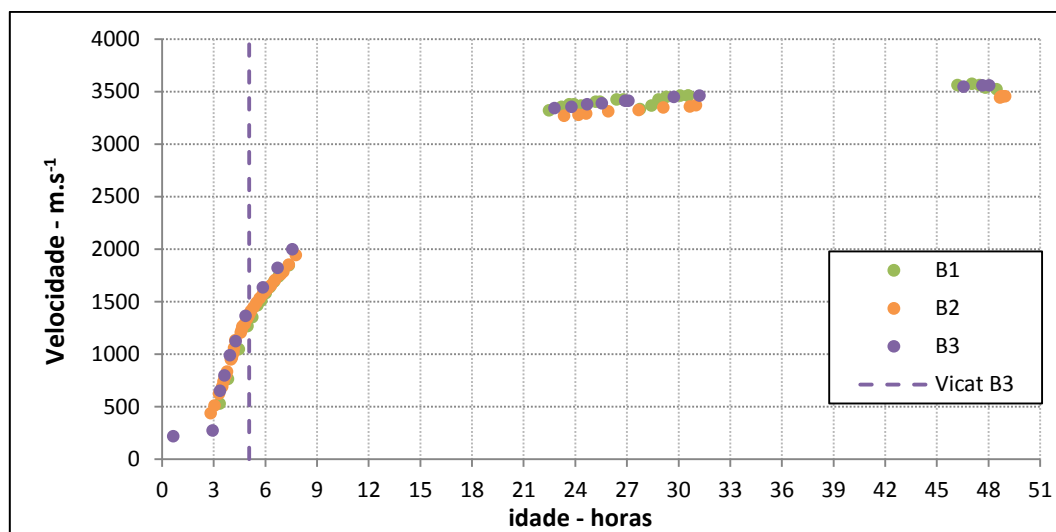


Figura 5.12 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons nas primeiras 48 horas dos provetes B1, B2, B3 e respetivo tempo de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.

Na Figura 5.12, a reprodução da grandeza dos valores de ultrassons dos três provetes é bem patente, pelo que podemos concluir que o molde HC2 não irá interferir nos resultados de ultrassons nos ensaios realizados. Os valores de velocidade de ultrassons obtidos ao fim de 2 dias para os 3 provetes, é de cerca de 3500 m/s, valor esse, que se enquadra dentro da gama de valores previstos para velocidades no betão que se situam entre 3000 e 5000 m/s [20].

De acordo com o gráfico anterior, a evolução da velocidade de ultrassons desenvolve-se três períodos diferentes. Numa primeira fase, parece haver uma estagnação da microestrutura da pasta cimentícia (período indução) durante as primeiras 3 horas. Depois entre as 3 e as 26 horas dá-se um aumento abrupto dos valores de velocidade de ultrassons (período de aceleração) e daí em diante, parece dar-se um crescimento mais gradual dos valores de velocidade de ultrassons (período de após aceleração). O comportamento acabado de descrever parece de alguma forma, repetir-se com os valores de resistividade.

Nos últimos três gráficos, foi possível visualizar a tracejado o tempo de início de presa da pasta que originou o provete B3. Desta forma, ao incluir este dado, tentou-se relacionar a hora de início de presa da pasta com o desenvolvimento das curvas de temperatura, resistividade e ultrassons. Dessa análise e, para os resultados de resistividade, parece que a partir do momento em que se dá o tempo de início de presa das pastas, é quando se dá o crescimento mais acelerado dos valores de resistividade.

De realçar que o termo que aparece legendado da Figura 5.13 como “coesão”, apesar de não constar na norma que rege o procedimento de ensaio de Vicat, pretende representar o momento a partir do qual a abertura criada pela penetração da agulha de Vicat deixa de ser “tapada” quando é removida a respetiva agulha, indiciando de certa forma, que a pasta a ser ensaiada começa a apresentar alguma consistência. Verifica-se, também, que após o tempo de início de presa os valores obtidos pelo ensaio de Vicat, são inconsistentes, pelo que foram tomados apenas como referência do tempo de início de presa.

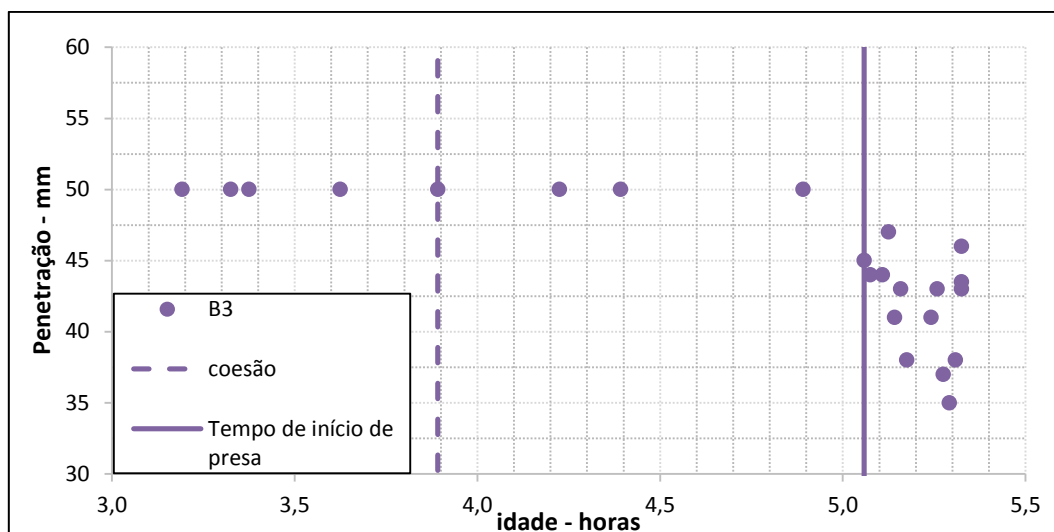


Figura 5.13 – Ensaio de Vicat da pasta que originou o provete B3.

5.5. FIABILIDADE DOS MOLDES HC2A, HC2B E HC2C

Nos próximos gráficos serão apresentados, para a mesma pasta de cimento de referência, os resultados obtidos nos moldes HC2, HC2A, HC2B e HC2C, que originaram os provetes C1, C2, C3 e C4 respetivamente, com o intuito de se perceber se os resultados obtidos entre eles são equivalentes, ou seja, perceber se existe fiabilidade entre os diferentes resultados.

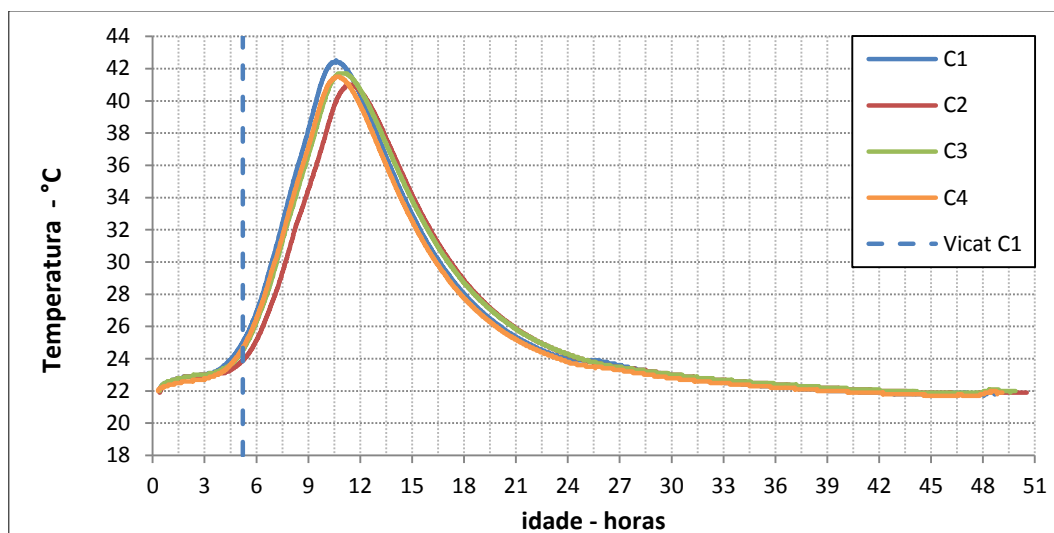


Figura 5.14 - Evolução da temperatura nas primeiras 48 h dos provetes C1, C2, C3 e C4 e respetivo tempo de início de presa do provete C1 dado pelo ensaio de Vicat.

Na Figura 5.14, percebe-se que os valores de pico de temperatura e as respetivas idades de hidratação entre os vários provetes são muito próximas (Quadro 5.5), pelo que se pode afirmar que existe fiabilidade de resultados de temperatura entre os diferentes moldes instrumentados.

Quadro 5.5 - Valores característicos das curvas de temperatura dos provetes C1, C2, C3 e C4.

Proвете	Temperatura máx (°C)	Idade (h)
C1	42,5	10,6
C2	41,0	11,2
C3	41,7	10,7
C4	41,5	10,5

No Quadro 5.6 é possível visualizar os valores de resistividade elétrica (RE) e velocidade de propagação de ultrassons (UPV), registados às 48 horas e 28 dias de idade.

Quadro 5.6 – Resistividade elétrica e velocidade de propagação de ultrassons.

Proвете	RE (kΩ.cm)		UPV (m.s ⁻¹)	
	48h	28 dias	48h	28 dias
C1	0,79	1,64	3475,80	3849,00
C2	0,72	1,44	3498,30	3833,30
C3	0,77	1,52	3489,30	3808,90
C4	0,81	1,84	3500,10	3834,40

Na figura seguinte é possível visualizar a evolução de resistividade elétrica ao longo das primeiras 48 horas de hidratação do cimento.

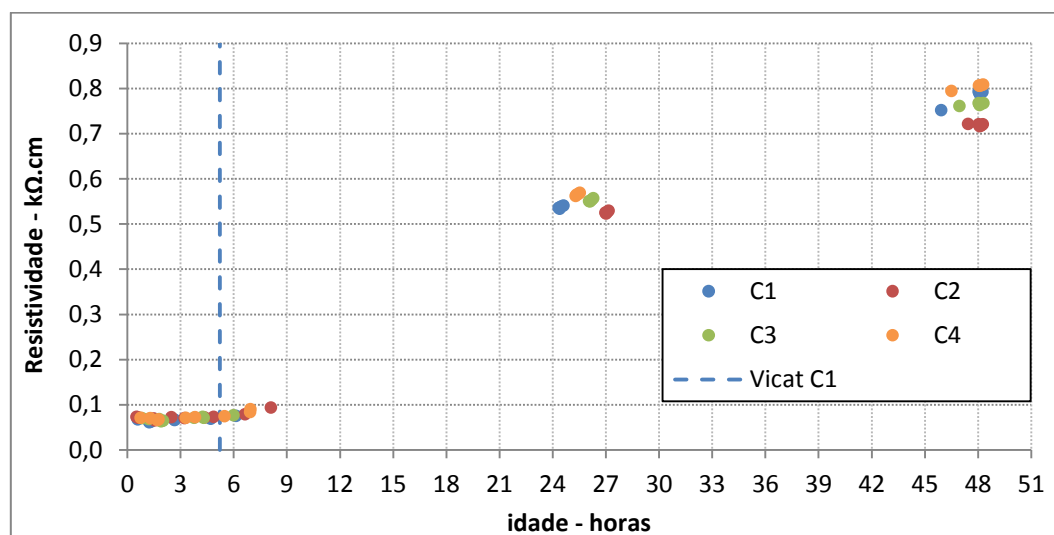


Figura 5.15 - Evolução da resistividade nas primeiras 48 h dos provetes C1, C2, C3 e C4 e respetivo tempo de início de presa do provete C1 dado pelo ensaio de Vicat.

No que diz respeito à resistividade, os resultados da Figura 5.15, apresentam uma tendência muito semelhante, chegando a haver sobreposição de valores de resistividade no início e no final do ensaio. Mais uma vez, fica espelhada a equivalência dos valores obtidos nos quatro moldes.

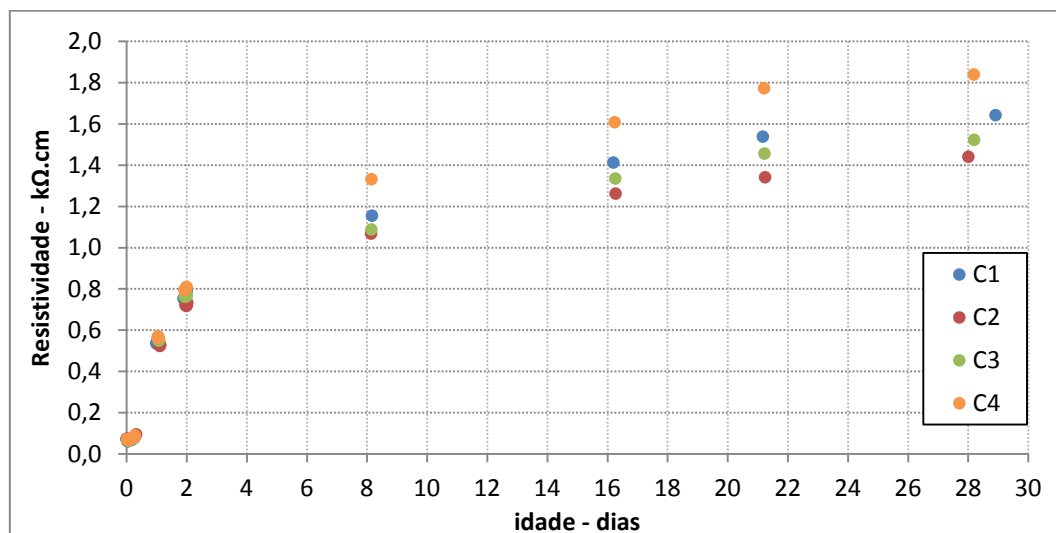


Figura 5.16 - Evolução da resistividade elétrica ao longo de 28 dias dos provetes C1, C2, C3 e C4.

Ao comparar os valores de resistividade elétrica às 48 horas com os valores de 28 dias, verifica-se que estes aumentam para cerca do dobro. Além disso, às 48 horas o provete C4 era 5% maior que o C3, 12,5% que o C2 e 2,5 % maior que o C1. Aos 28 dias o provete C4 era 21% maior que o C3, 27% que o C2 e 12 % maior que o C1. Com estes dados verifica-se que, entre as 48 horas e os 28 dias, mantém-se a mesma ordem de crescimento, ou seja, o C4 é o que apresenta o maior valor de resistividade elétrica seguido de C1, C3 e C2 nas duas idades.

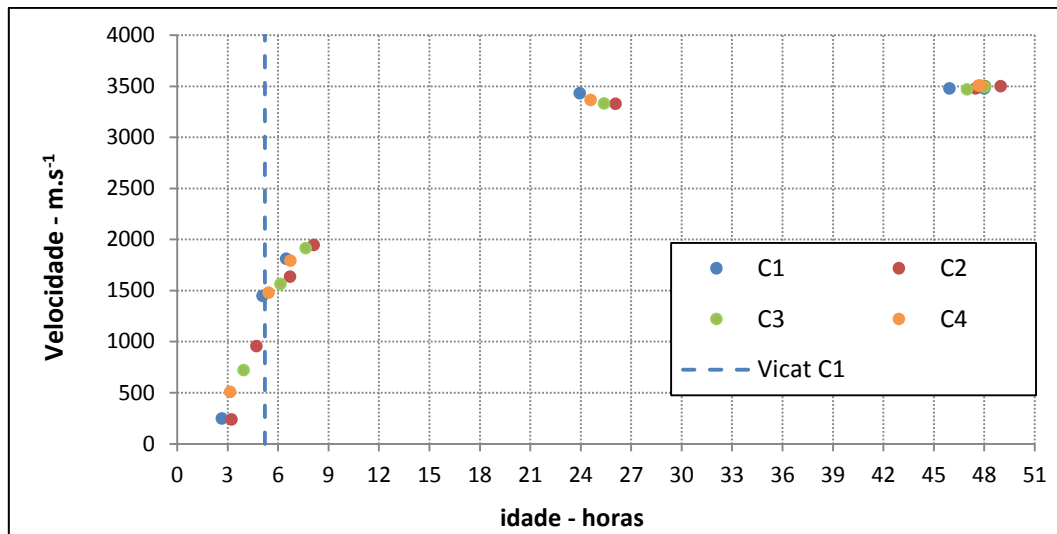


Figura 5.17 - Evolução da velocidade de propagação de ondas de ultrassons nas primeiras 48 horas dos provetes C1, C2, C3 e C4 e respetivo tempo de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.

Da análise da Figura 5.17, volta a haver sobreposição de valores ao longo e no final do ensaio. Assim sendo, com este conjunto de gráficos parece ficar demonstrado que existe um grau de fiabilidade entre os moldes HC2, HC2A, HC2B e HC2C suficiente para se poder avançar para um estudo paramétrico de pastas, argamassas e betões.

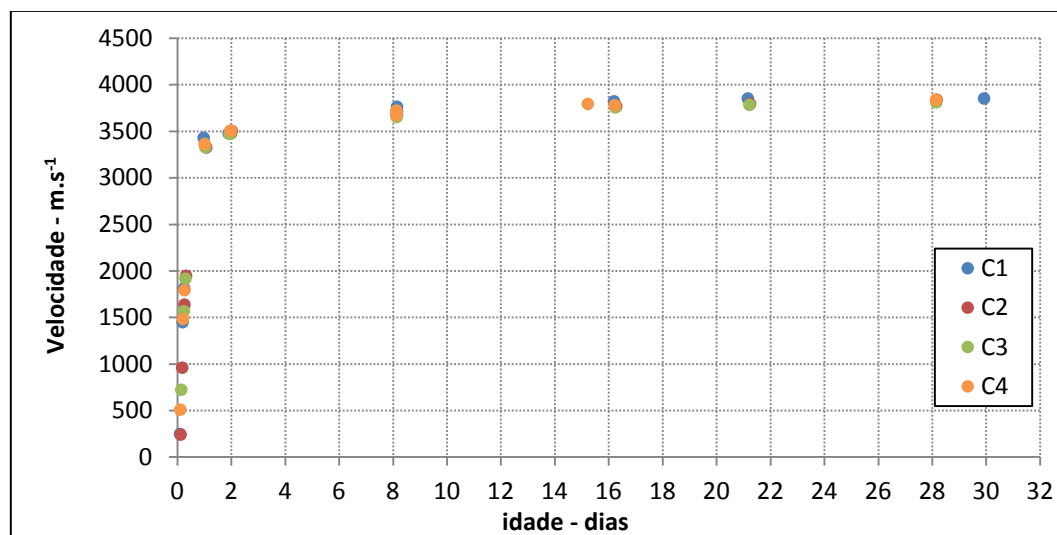


Figura 5.18 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons ao longo de 28 dias dos provetes C1, C2, C3 e C4.

Com base nos resultados do Quadro 5.6 verifica-se que os valores registados pelos 4 provetes são muito semelhantes, diferindo entre si, não mais do que 0,6%. Com base nestas observações, pode-se concluir-se que a tendência verificada aos 28 dias é a mesma que se verificou aos 2 dias de idade, pois os valores de velocidade de ultrassons continuam a manterem-se sobrepostos, apresentando um crescimento de cerca de 10%.

6

ESTUDOS PARAMÉTRICOS

6.1. INTRODUÇÃO

Tal como foi referido anteriormente, um dos objetivos desta tese passou a ser a realização de vários estudos paramétricos e tentar perceber qual o efeito que cada parâmetro teria na evolução da hidratação do cimento ao longo das primeiras 48 horas. No seguimento deste raciocínio, no ponto 6.2 serão apresentadas as misturas, amassaduras, pastas e argamassas que foram ensaiadas, assim como os resultados dos ensaios de espalhamento efetuados para cada amassadura.

No ponto 6.3 serão apresentados os resultados obtidos no estudo paramétrico da relação água-cimento e apresentados os resultados dos ensaios destrutivos de resistência à compressão correlacionados com os resultados de ultrassons e resistividade dos vários estudos paramétricos.

No ponto 6.4 poder-se-á observar a influência da adição de diferentes concentrações de areia na hidratação do cimento.

No ponto 6.5 e 6.6, se os resultados refletem os efeitos causados pela concentração e tipo de fibras de aço, respetivamente. E por último, no ponto 6.7, serão apresentados os valores obtidos na análise de um betão auto-compactável desenvolvido no âmbito do projeto Betofibra, designado por argamassa projeto.

6.2.MISTURAS, AMASSADURAS, PASTAS E ARGAMASSAS

No Quadro 6.1 é possível visualizar a composição das diferentes misturas usadas nos diferentes estudos paramétricos.

Quadro 6.1 – Constituição das misturas utilizadas no estudo paramétrico.

Mistura	Constituintes (kg/m³)											
	CEM	FC	Sp	Ag1	Ag2	SF	Fi6	Fi9	Fi12	ArF	ArM	w/c
M1	1092,0	491,3	20,7	358,0	89,3	-	-	-	-	-	-	0,40
M2	751,3	784,0	20,7	358,0	89,3	-	-	-	-	-	-	0,60
M3	614,7	901,3	20,7	358,0	89,3	-	-	-	-	-	-	0,67
M4	551,3	956,0	20,7	358,0	89,3	-	-	-	-	-	-	0,80
M5	655,3	294,7	12,7	217,3	54,0	-	-	-	-	524,7	524,7	0,40
M6	546,0	246,0	10,7	182,0	45,3	-	-	-	-	656,0	656,0	0,40
M7	655,3	294,7	12,7	217,3	54,0	-	235,3	-	-	524,7	524,7	0,40
M8	655,4	294,7	12,0	217,3	54,0	-	-	235,3	-	524,7	524,7	0,40
M9	655,4	294,7	12,0	217,3	54,0	-	39,3	-	-	524,7	524,7	0,40
M10	655,4	294,7	12,0	217,3	54,0	-	118	-	-	524,7	524,7	0,40
M11	794,9	311,4	22,2	123,0	30,8	79,5	-	117,8	117,8	941,0	-	0,25

Nota: na mistura M11 o superplastificante Viscocrete 3006 foi substituído pelo Viscocrete 20HE.

Em que:

CEM – Cimento;

FC – Filer calcário;

Sp – Superplastificante;

Ag1 – Cerca de 80% da água total;

Ag2 – Cerca de 20% da água total;

SF – Sílica de fumo;

Fi 6 – Fibras de aço de 6 mm;

Fi 9 – Fibras de aço de 9 mm;

Fi 12 – Fibras de aço de 12 mm;

ArF – Areia fina;

ArM – Areia média

w/c – Razão água/cimento

No Quadro 6. é possível visualizar as amassaduras e provetes que foram produzidos pelas diferentes misturas. É de referir que todas as percentagens apresentadas são percentagens mássicas.

Quadro 6.2 – Amassaduras e provetes fabricados com diferentes misturas, data e hora de fabrico.

Proвете	Mistura	Amassadura	Data e hora de fabrico
D1 (w/c: 0.40)	M1	AM10	07-05-2013 13:03
D2 (w/c: 0.60)	M2	AM11	07-05-2013 12:32
D3 (w/c: 0.67)	M3	AM12	07-05-2013 11:47
D4 (w/c: 0.80)	M4	AM13	Não fabricada
E1 (Ref.)	M1	AM14	14-05-2013 10:10
E2 (40% Ar)	M5	AM15	14-05-2013 10:47
E3 (50% Ar)	M6	AM16	14-05-2013 11:30
E4 (40% Ar + 3% Fi 6)	M7	AM17	14-05-2013 12:15
F1 (40% Ar + 3% Fi 9)	M8	AM18	21-05-2013 9:56
F2 (40% Ar + 0.5% Fi 6)	M9	AM19	21-05-2013 10:47
F3 (40% Ar + 1.5% Fi 6)	M10	AM20	21-05-2013 11:25
F4 (Argamassa Projeto)	M11	AM21	21-05-2013 12:26
G1 (w/c: 0.40)	M1	AM22	03-06-2013 10:05
G2 (w/c: 0.60)	M2	AM23	03-06-2013 11:05
G3 (w/c: 0.67)	M3	AM24	03-06-2013 11:54
G4 (w/c: 0.80)	M4	AM25	03-06-2013 12:39

Uma forma de aferir a reprodutibilidade da pasta de cimento de referência usada ao longo do estudo preliminar, passou por executar um ensaio de espalhamento para cada amassadura, em pastas realizou-se com o mini-cone e em argamassas com o cone tronco-cónico. Os resultados dos ensaios de espalhamento são apresentados nas Figuras 6.1 e 6.2.

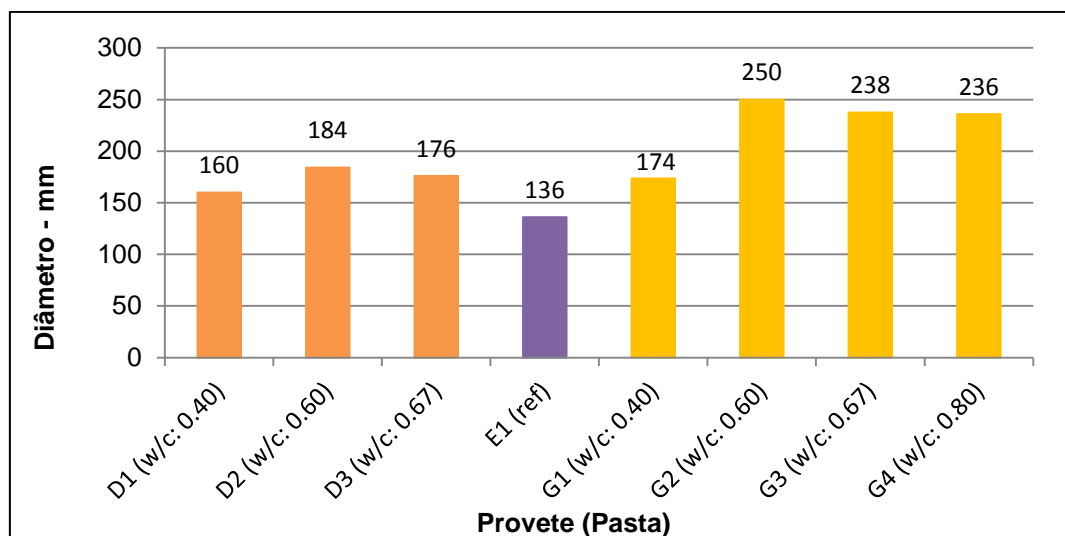


Figura 6.1 - Resultados dos ensaios de espalhamento em pastas, dos estudos paramétricos.

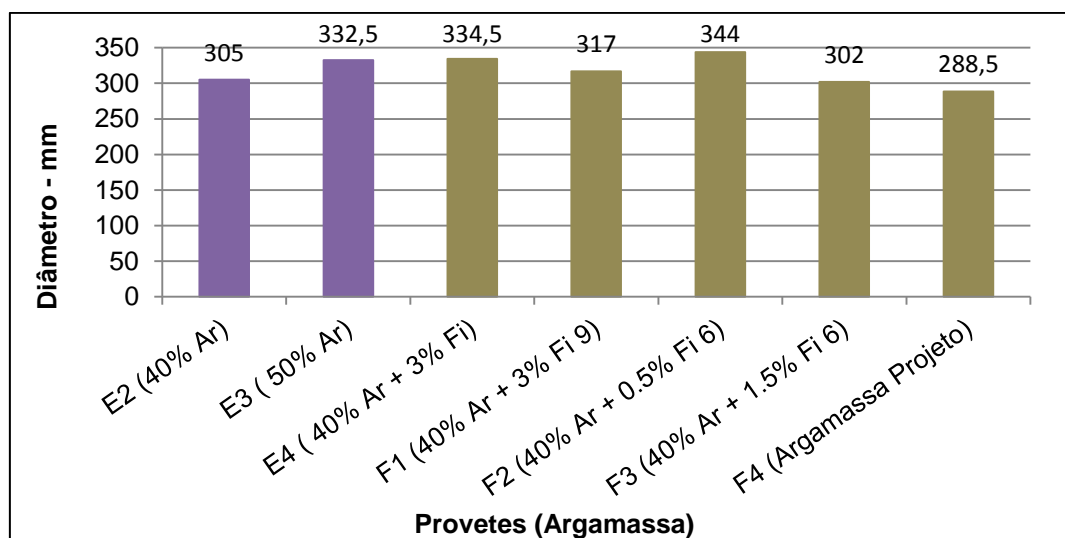


Figura 6.2 - Resultados dos ensaios de espalhamento em argamassas, dos estudos paramétricos.

6.3. RAZÃO ÁGUA-CIMENTO w/c

Os provetes usados para realizar o estudo paramétrico da relação água/cimento, foram os designados D1(w/c: 0.40), D2(w/c: 0.60), D3(w/c: 0.67) e o D4(w/c: 0.80). Contudo, houve necessidade de repetir este estudo paramétrico de água/cimento, e os provetes estudados foram G1(w/c: 0.40), G2(w/c: 0.60), G3(w/c: 0.67) e G4 (w/c: 0.80). Como os resultados obtidos de temperatura, resistividade e ultrassons da série de provetes D foram praticamente iguais aos resultados obtidos na série de provetes G e como na série D o provete com a razão água/cimento de 0.80 não foi produzido, apresentam-se apenas os resultados provenientes dos provetes da série G.

No Quadro 6.3 é possível visualizar os valores de resistividade elétrica (RE) e velocidade de propagação de ultrassons (UPV), registados às 48 horas e 28 dias de idade.

Quadro 6.3 – Resistividade elétrica e velocidade de propagação de ultrassons.

Provete	RE (k Ω .cm)		UPV (m.s ⁻¹)	
	48h	28 dias	48h	28 dias
G1 (w/c 0.40)	0,71	1,31	3523.10	3823,50
G2 (w/c 0.60)	0,43	0,80	3208,00	3626,40
G3 (w/c 0.67)	0,31	0,65	3048,60	3533.30
G4 (w/c 0.80)	0,23	0,42	3487,70	4034,00

No gráfico seguinte é possível visualizar a evolução da temperatura para cada provete da série G (razão água/cimento).

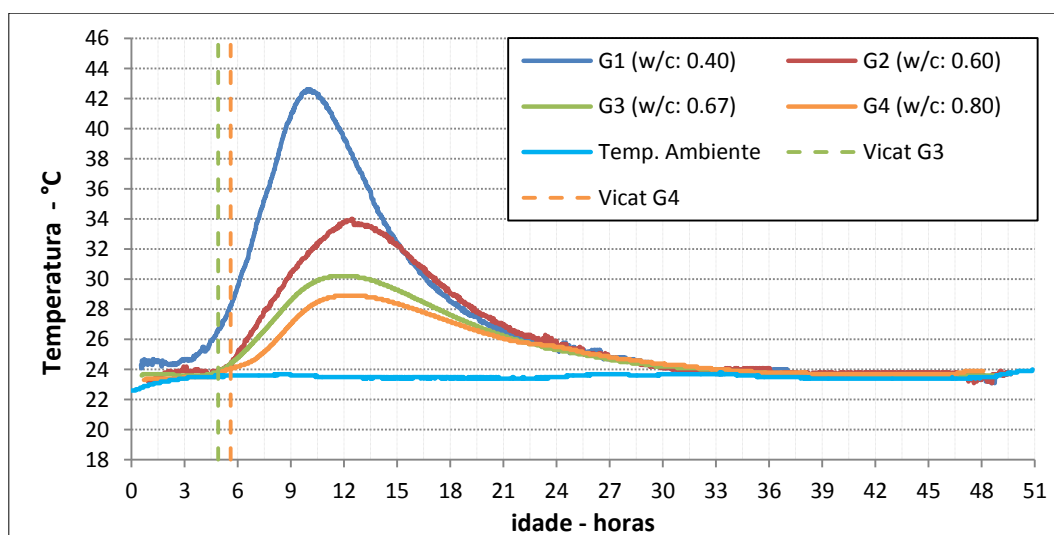


Figura 6.3 - Evolução da temperatura nas primeiras 48 h dos provetes G1 (w/c: 0.40), G2 (w/c: 0.60), G3 (w/c: 0.67) e G4 (w/c: 0.80) e respetivos inícios de presa dado pelo ensaio de Vicat.

Da análise da Figura 6.3 pode-se constatar que com o aumento da relação água/cimento o início do aumento acentuado da temperatura (período de aceleração) é cada vez mais tardio e o valor de pico de temperatura é cada vez mais baixo. Tal fenómeno está diretamente relacionado com a diminuição do principal constituinte da pasta, responsável pelo aumento da temperatura no processo de hidratação do cimento. No quadro seguinte observa-se o valor do pico de temperatura e a idade a que ocorreu.

Quadro 6.4 - Valores característicos das curvas de temperatura dos provetes G1, G2, G3 e G4.

Proвете	Temperatura máx. (°C)	Idade (h)
G1 (w/c: 0.40)	42,6	9,8
G2 (w/c: 0.60)	34,0	12,4
G3 (w/c: 0.67)	30,2	11,2
G4 (w/c: 0.80)	28,9	11,5

No gráfico seguinte apresenta-se a evolução da resistividade nos provetes supracitados.

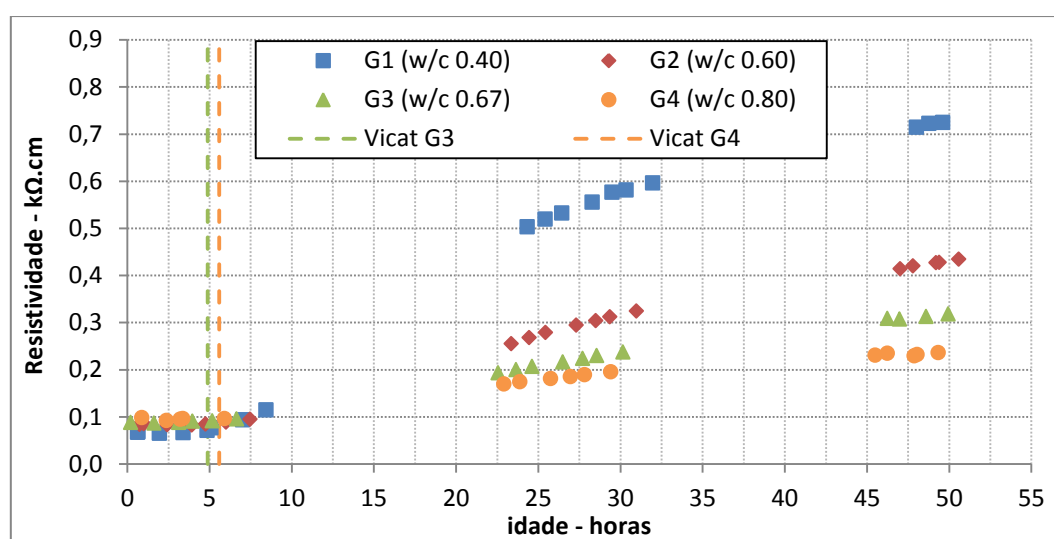


Figura 6.4 - Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes G1 (w/c: 0.40), G2 (w/c: 0.60), G3 (w/c: 0.67) e G4 (w/c: 0.80) e respetivos tempos de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.

Tal como se pode constatar na Figura 6.4, à medida que se aumenta a razão água/cimento, a resistividade vai diminuindo. Pois ao haver uma menor quantidade de cimento para reagir com a água, esta vai ficar disponível em maior quantidade e permite a condução da corrente elétrica, fazendo diminuir o valor de resistividade. Estes resultados seguem a mesma tendência apresentada por Silva [17], ao reportar que a resistividade elétrica da pasta cimentícia aumenta, à medida que diminui a relação água/cimento.

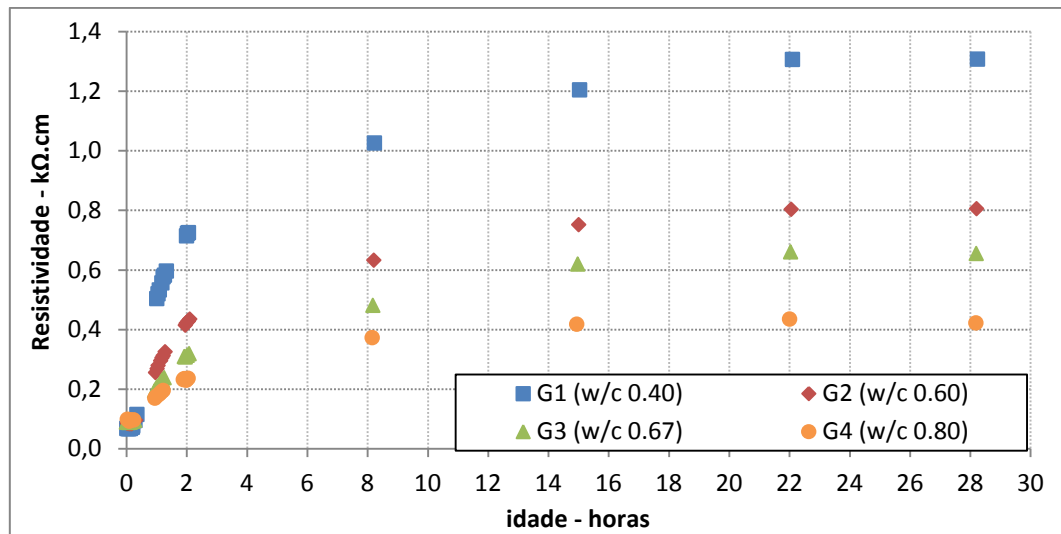


Figura 6.5 - Evolução da resistividade elétrica ao longo de 28 dias dos provetes G1 (w/c: 0.40), G2 (w/c: 0.60), G3 (w/c: 0.67) e G4 (w/c: 0.80).

Da análise da Figura 6.5 verifica-se que ao longo do tempo o valor da resistividade elétrica tende a aumentar, se bem que a partir dos 22 dias de idade esse crescimento passa ser mais gradual e passa-se a observar uma tendência para o valor de resistividade estabilizar.

Ao comparar os valores de resistividade elétrica às 48 horas com os valores de 28 dias, verifica-se que estes aumentam sensivelmente para o dobro. Às 48 horas o provete G1 era 65% maior que o G2, 129% que o G3 e 208 % maior que o G4. Aos 28 dias o provete G1 era 64% maior que o G2, 102% que o G3 e 212 % maior que o G4. Com estes dados, parece manter-se a mesma proporção dos valores de resistividade entre si, nas duas idades. Além disso, parece haver uma correlação entre os valores de resistividade às 48 horas e aos 28 dias.

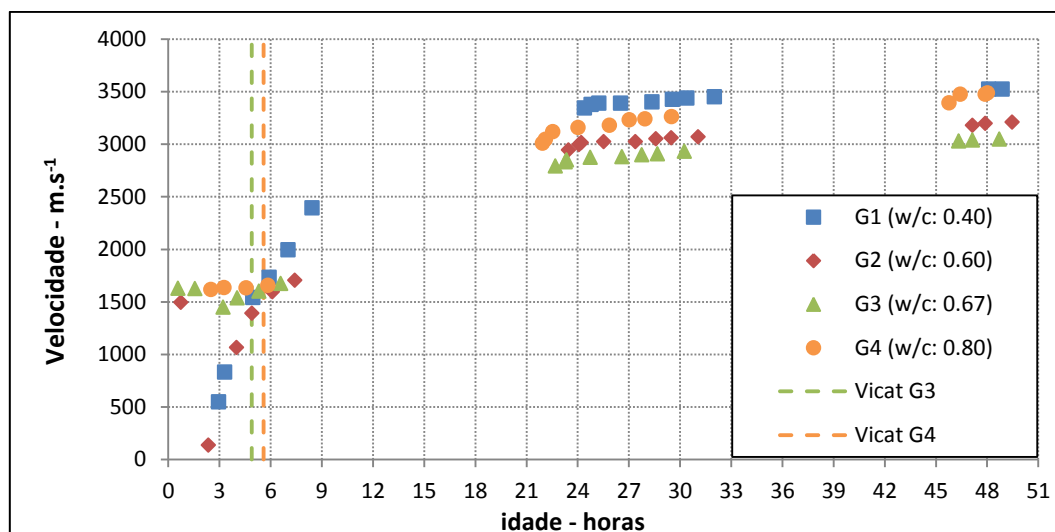


Figura 6.6 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons nas primeiras 48 h dos provetes G1 (w/c: 0.40), G2 (w/c: 0.60), G3 (w/c: 0.67) e G4 (w/c: 0.80) e respetivos tempos de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.

Pela análise da Figura 6.6, no que diz respeito à evolução de ultrassons, à medida que se baixa a razão água/cimento a velocidade de propagação de ultrassons tende a aumentar, pois quanto maior for a percentagem de cimento numa composição, maior será a resistência e solidez da estrutura cimentícia, permitindo que a velocidade de propagação das ondas sejam mais elevadas. Naik et al [20], concluíram que a um aumento da relação água/cimento corresponde uma diminuição da velocidade de impulso, indo de encontro aos resultados obtidos neste estudo.

No provete G4 verifica-se a existência de um patamar inicial de valores de ultrassons. Esta constatação poderá estar relacionada com a deposição dos finos na base do molde, e os valores obtidos, referem-se aos valores de velocidade de propagação na água em suspensão no molde instrumentado, pois os valores obtidos são muito próximos dos da água (1500 m/s).

Para uma melhor compreensão e enquadramento deste resultado, foi realizada uma medição de ultrassons com o molde HC2, cheio de água para medir a sua velocidade de propagação. Ao realizar este ensaio obtiveram-se velocidades de propagação de ondas na ordem de 1500 m/s. Isto comprova a justificação apresentada para os valores obtidos pelo provete G4.

Quanto ao facto do provete G4 possuir valores de velocidades de ultrassons superiores ao G3 e G2 ao fim de 48 horas pode dever-se ao facto de haver uma precipitação de finos, que fez com que os valores medidos por ultrassons se propagassem pela base do provete, obtendo assim maiores valores de ultrassons.

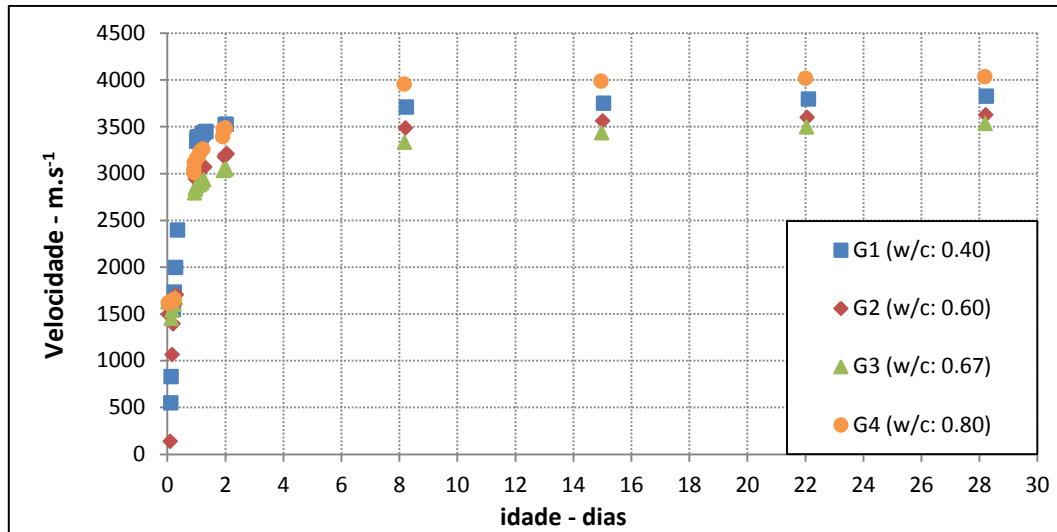


Figura 6.7 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons ao longo de 28 dias dos provetes G1 (w/c: 0.40), G2 (w/c: 0.60), G3 (w/c: 0.67) e G4 (w/c: 0.80).

Na Figura 6.7 verifica-se que ao longo do tempo o valor da velocidade de propagação de ultrassons tende a aumentar, e a partir dos 8 dias de idade esse crescimento passa ser mais gradual e observa-se uma tendência para o valor de velocidade de ultrassons estabilizar.

Se compararmos os valores de velocidade de ultrassons às 48 horas com os valores aos 28 dias, verifica-se que estes aumentam entre 9 a 16%. Às 48 horas o provete G1 era 10% maior que o G2, 16% que o G3 e 10 % maior que o G4. Aos 28 dias o provete G1 era 5% maior que o G2, 8% que o G3. O G4 inverte a tendência inicial e passa a ser maior 6% que o G1.

Com estes dados verifica-se que, à exceção do G4, a proporção de crescimento da velocidade de ultrassons entre si, passou para cerca de metade do valor inicial. Esta constatação, permite concluir que parece haver uma correlação entre os valores de resistividade às 48 horas e aos 28 dias.

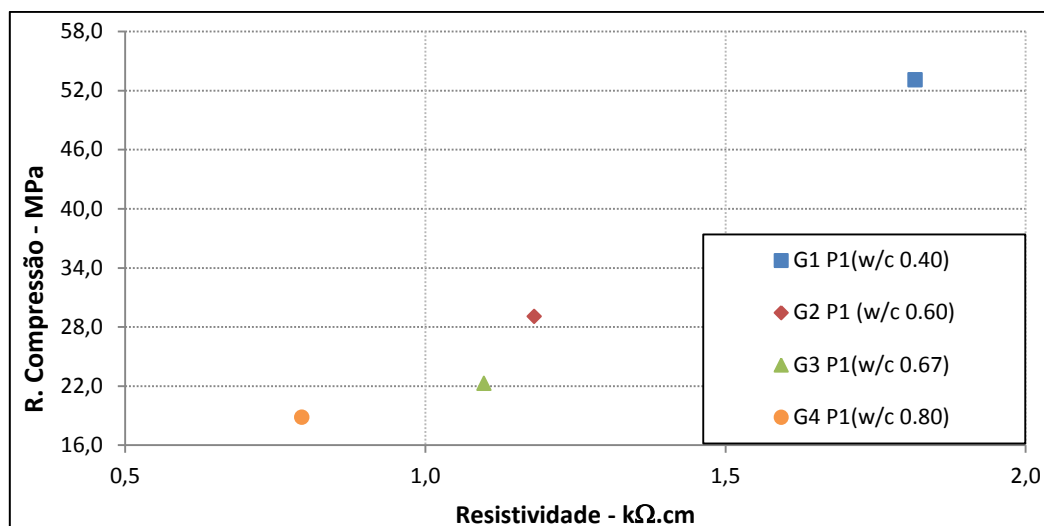


Figura 6.8 – Correlação entre resistividade elétrica com a resistência à compressão, aos 28 dias para o estudo paramétrico da razão água/cimento.

Tal como se pode observar na Figura 6.8, os resultados parecem indicar a existência de uma correlação entre a resistividade elétrica e a respetiva resistência à compressão, aos 28 dias. Pois à medida que se aumenta a razão água/cimento regista-se uma resistividade elétrica e resistência à compressão mais baixas.

No entanto, para este estudo realizaram-se ensaios apenas com um provete prismático, pelo que os resultados são meramente indicativos, pois seria necessário realizar mais ensaios para se conseguir estabelecer esta correlação de forma mais consistente. No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos de resistividade elétrica, velocidade de propagação de ultrassons e resistência à compressão e tração aos 28 dias.

Quadro 6.5 - Valores de resistividade elétrica, velocidade ultrassons e resistência à compressão e tração.

Provedor	RE 48 horas (kΩ.cm)	RE 28 dias (kΩ.cm)	UPV 48 horas (m.s ⁻¹)	UPV 28 dias (m.s ⁻¹)	RC (MPa)	RT (MPa)
G1 P1(w/c 0.40)	0.9	1.8	3532.0	3990.0	53.1	11.4
G2 P1 (w/c 0.60)	0.4	1.2	3493.4	3960.4	29.1	9.3
G3 P1(w/c 0.67)	0.3	1.1	4000.0	4456.8	22.3	8.6
G4 P1(w/c 0.80)	0.3	0.8	3970.2	4456.8	18.8	6.6

Como ao longo dos restantes ensaios paramétricos não se verificaram boas correlações entre os valores de resistividade elétrica e velocidades de propagação de ultrassons com os valores de resistência à tração e à compressão, optou-se por não se apresentar os restantes gráficos de correlações, tal como apresentado na Figura 6.8

6.4. CONCENTRAÇÃO DE AREIA

Neste estudo paramétrico tentou-se verificar a influência da concentração de areias no desenvolvimento da hidratação do cimento nas primeiras idades.

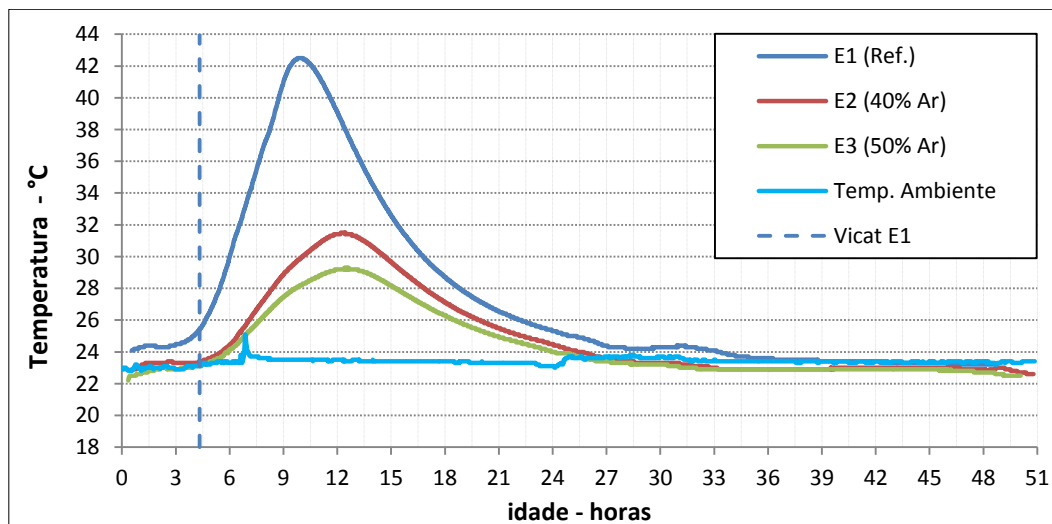


Figura 6.9 - Evolução da temperatura nas primeiras 48 h dos provetes E1 (Ref.), E2 (40% Ar) e E3 (50% Ar) e respectivos tempos de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.

Na Figura 6.9 observa-se a evolução da temperatura dos provetes da série E, e pode-se afirmar que à medida que se aumenta a concentração de areia, mais baixo será o valor máximo de temperatura atingido. Isto porque parte da energia libertada na reação exotérmica do cimento com a água, será absorvida no aquecimento da areia e porque a quantidade de cimento também vai diminuindo.

Pode-se verificar também, que pelo facto do provete E1 não possuir areia, a sua fase de indução é mais curta que os outros provetes e, à medida que se vai aumentando a concentração de areia, o período de aceleração é cada vez mais tardio. Verifica-se também que a aceleração do crescimento da temperatura é mais elevada para o provete E1 do que para os restantes provetes e, também aqui, se verifica que à medida que se vai aumentando a concentração de areia, essa aceleração vai diminuindo.

No Quadro 6.6, observa-se o valor máximo de temperatura alcançado e a idade a que este ocorreu.

Quadro 6.6 - Valores característicos das curvas de temperatura dos provetes E1, E2 e E3.

Proвете	Temperatura máx. (°C)	Idade (h)
E1 (Ref)	42,5	9,7
E2 (40% Ar)	31,5	12,2
E3 (50% Ar)	29,3	12,4

No Quadro 6.7 é possível visualizar os valores de resistividade elétrica (RE) e velocidade de propagação de ultrassons (UPV), registados às 48 horas e 28 dias de idade.

Quadro 6.7 – Resistividade elétrica e velocidade de propagação de ultrassons.

Provete	RE (k Ω .cm)		UPV (m.s ⁻¹)	
	48h	28 dias	48h	28 dias
E1 (Ref.)	0,74	1,38	3525,10	3840,60
E2 (40% Ar)	1,45	2,45	3949,30	4254,50
E3 (50% Ar)	1,60	3.36	4128,90	4460,70

Na figura seguinte apresenta-se o gráfico de resistividade elétrica para as primeiras 48 horas.

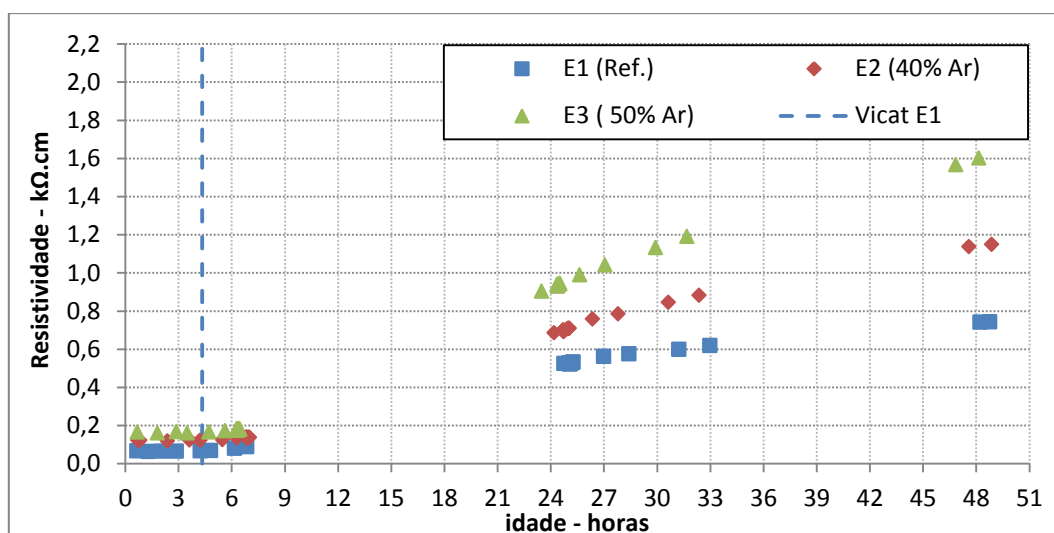


Figura 6.10 - Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes E1 (Ref.), E2 (40% Ar) e E3 (50% Ar) e respetivos tempos de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.

Na Figura 6.10, com os valores de resistividade constata-se que à medida que se vai aumentando a quantidade de areia os valores de resistividade vão aumentando. Este aumento é de tal forma significativo, que o valor de resistividade do provete E3 é 2,16 vezes maior do que a do provete E1 e 1,40 vezes maior que o provete E2. Os resultados obtidos estão em consonância com o estudo realizado por Hughes [18], que concluiu que o aumento na dosagem de agregados resultará num aumento de resistividade.

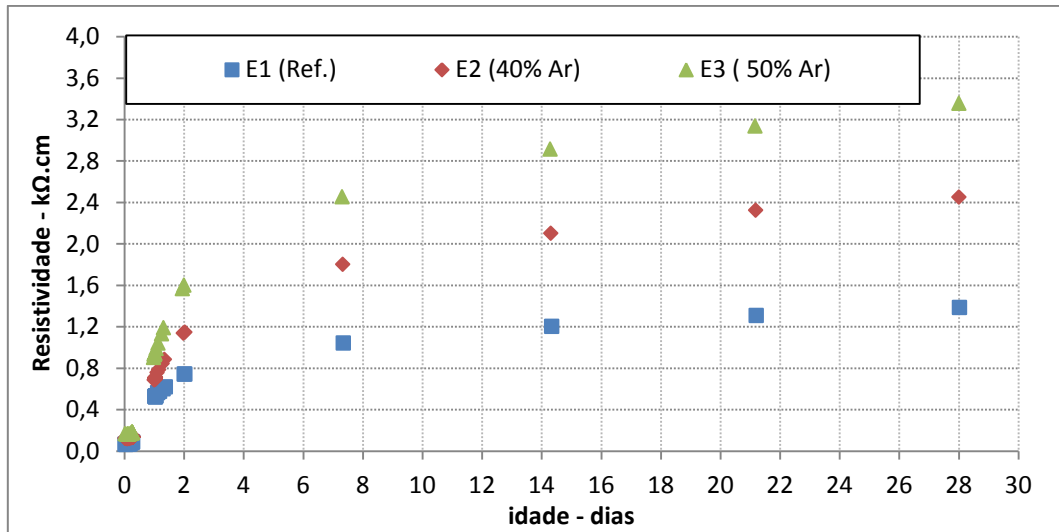


Figura 6.11 - Evolução da resistividade elétrica ao longo de 28 dias dos provetes E1 (Ref.), E2 (40% Ar) e E3 (50% Ar).

Da Figura 6.11 observa-se a mesma tendência que foi constatada nas primeiras 48 horas, ou seja, à medida que se aumenta a concentração de areia, aumentam os valores de resistividade elétrica.

Às 48 horas, ao comparar o provete E2 com o E1, verifica-se que o valor de resistividade elétrica do E2 é 96% maior que o E1 e o E3 é 116% maior que o E1. Aos 28 dias o E2 é 78% maior que o E1 e o E3 é 143% maior que o E1. Além disso, verifica-se que, desde as 48 horas até aos 28 dias, há um aumento do valor de resistividade elétrica de 86, 59 e 47%, para o E1, E2 e E3, respetivamente. Com estes resultados, pode-se concluir que para o provete E2 e E3, que contêm areia na sua constituição, quanto maior a concentração de areia, menor a taxa de crescimento do valor de resistividade elétrica.

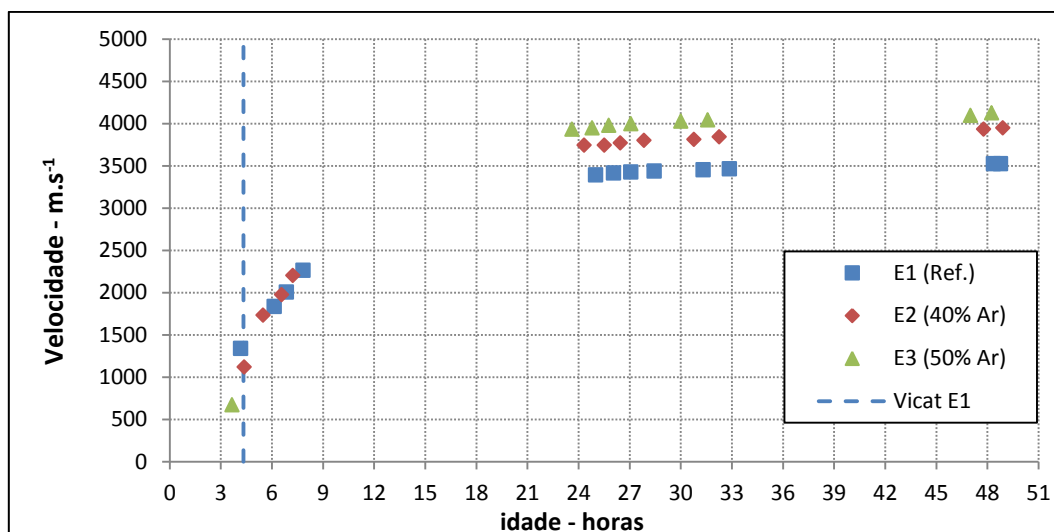


Figura 6.12 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons nas primeiras 48 horas dos provetes E1 (Ref.), E2 (40% Ar) e E3 (50% Ar) e respetivo tempo de início de presa dado pelo ensaio de Vicat.

Da análise da Figura 6.12 verifica-se que à medida que se vai aumentando a concentração de areia os valores de velocidade de ultrassons também vão aumentando, pois a estrutura cimentícia do betão fica mais densa com a adição de areia e promove assim, o aumento da velocidade das ondas de ultrassons. O valor de velocidade de propagação de ultrassons do provete E1, E2 e E3 é 3525, 3950 e 4130 m/s, respetivamente. Desta forma pode-se constatar que há um aumento de 12% na velocidade de propagação de ultrassons entre o provete E1 e E2 e cerca de 17% entre o provete E1 e E3. Os estudos estão em concordância com os realizados por Naik et al [20], que indicam que para concentrações de agregados mais altas resultam em velocidades de impulso mais elevadas.

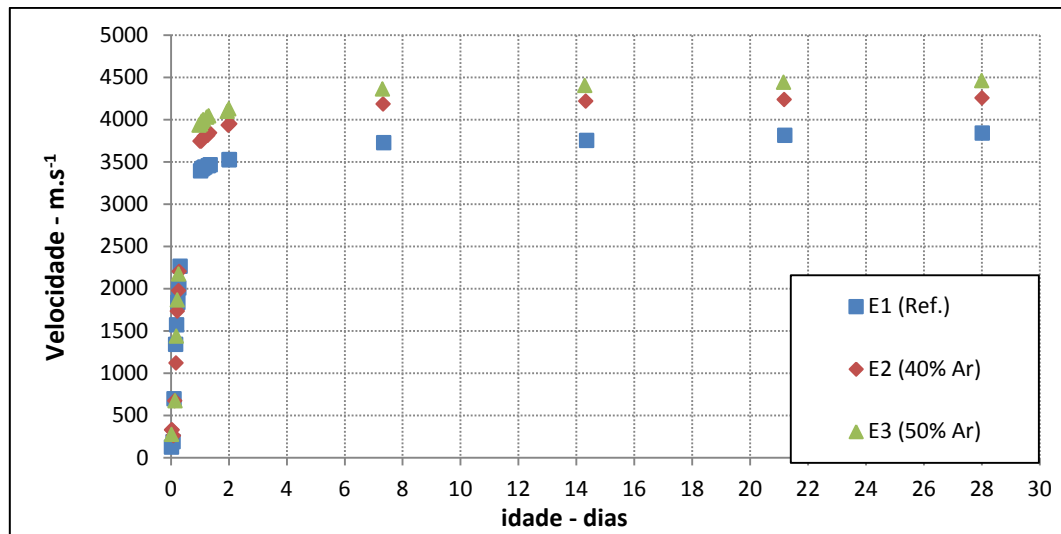


Figura 6.13 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons ao longo de 28 dias dos provetes E1 (Ref.), E2 (40% Ar) e E3 (50% Ar).

Na Figura 6.13 pode-se observar que ao longo do tempo os valores de velocidade de ultrassons tende a aumentar rapidamente até às 48 horas e de forma mais gradual, até aos 28 dias. A taxa de crescimento entre 48 horas e os 28 dias, é de cerca de 8%. Às 48 horas o provete E2 era 12% maior que o E1 e o E3 é 17% maior que o E1. Aos 28 dias o provete E2 era 20% maior que o E1 e o E3 é 16% maior que o E1. Ao comparar os provetes que têm areia na sua constituição, às 48 horas e aos 28 dias, verifica-se que o E3 apresenta um valor de velocidade de propagação de ultrassons 5% maior que o E2, para as duas idades.

6.5. CONCENTRAÇÃO DE FIBRAS

Na Figura 6.14 é possível visualizar a evolução da variação da temperatura das argamassas para provetes que não possuem ou apresentam diferentes concentrações de fibras de 6 mm.

Neste estudo paramétrico, houve necessidade de comparar provetes provenientes de amassaduras fabricadas em dias diferentes e, portanto, sujeitos a uma temperatura de cura diferente, ao longo das primeiras 48 horas.

Para eliminar o efeito que a temperatura ambiente poderia ter na comparação dos resultados, normalizou-se a evolução da temperatura nos provetes, subtraindo o valor da temperatura ambiente à temperatura registada no provete ao longo do ensaio.

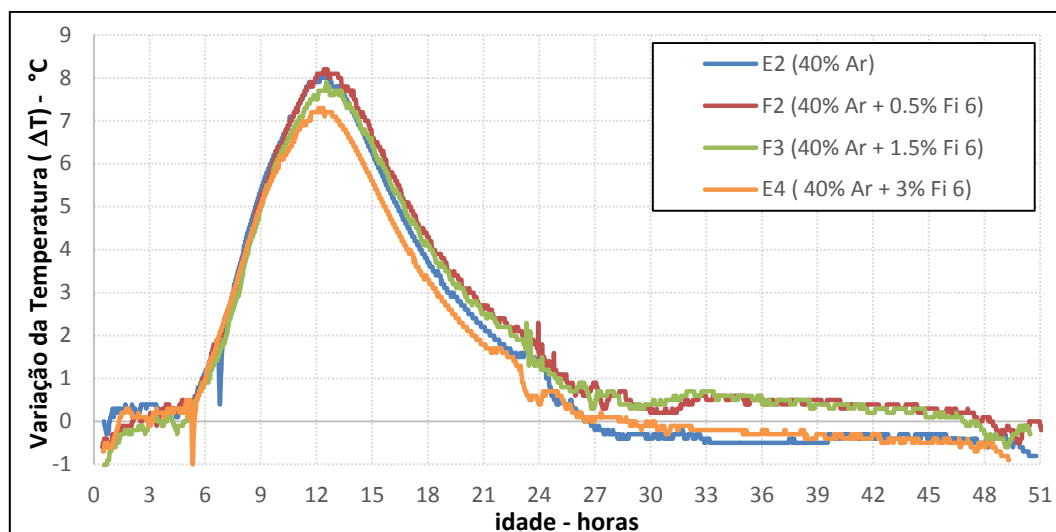


Figura 6.14 – Variação de Temperatura (ΔT) nas primeiras 48 h dos provetes E2 (40% Ar), F2 (40% Ar + 0.5% Fi 6), F3 (40% Ar + 1.5% Fi 6) e E4 (40% Ar + 3% Fi 6).

Das curvas de temperatura apresentadas no gráfico anterior, os resultados parecem indicar que à medida que se aumenta a concentração de fibras há uma diminuição do valor máximo de temperatura. No entanto, os resultados obtidos pelo provete F2 parece indicar que se a concentração de fibras for muito baixa, estas acabam por provocar um ligeiro aumento no valor máximo da temperatura.

No Quadro 6.8 observa-se a idade e o valor de temperatura máxima que foi registada no processo de hidratação do cimento, durante as primeiras 48 horas em cada provete.

Quadro 6.8 – Valores de temperatura máxima e respetiva idade.

Proвете	Temperatura máx. (°C)	ΔT (°C)	Idade (h)
E2 (40% Ar)	31,5	8,1	12,2
F2 (40% Ar + 0.5% Fi 6)	30,3	8,2	12,4
F3 (40% Ar + 1.5% Fi 6)	29,9	10,8	12,7
E4 (40% Ar + 3% Fi 6)	30,7	7,3	12,1

No Quadro 6.10 é possível visualizar os valores de resistividade elétrica (RE) e velocidade de propagação de ultrassons (UPV), registados às 48 horas e 28 dias de idade.

Quadro 6.9 – Resistividade elétrica e velocidade de propagação de ultrassons.

Proвете	RE (k Ω .cm)		UPV (m.s ⁻¹)	
	48h	28 dias	48h	28 dias
E2 (40% Ar)	1,45	2,45	3949,30	4254,50
F2 (40% Ar + 0.5% Fi 6)	1,07	2,22	3998,00	4344,20

F3 (40% Ar + 1.5% Fi 6)	0,77	1,42	3946,40	4285,10
E4 (40% Ar + 3% Fi 6)	0,75	1,31	3726,00	4260,30

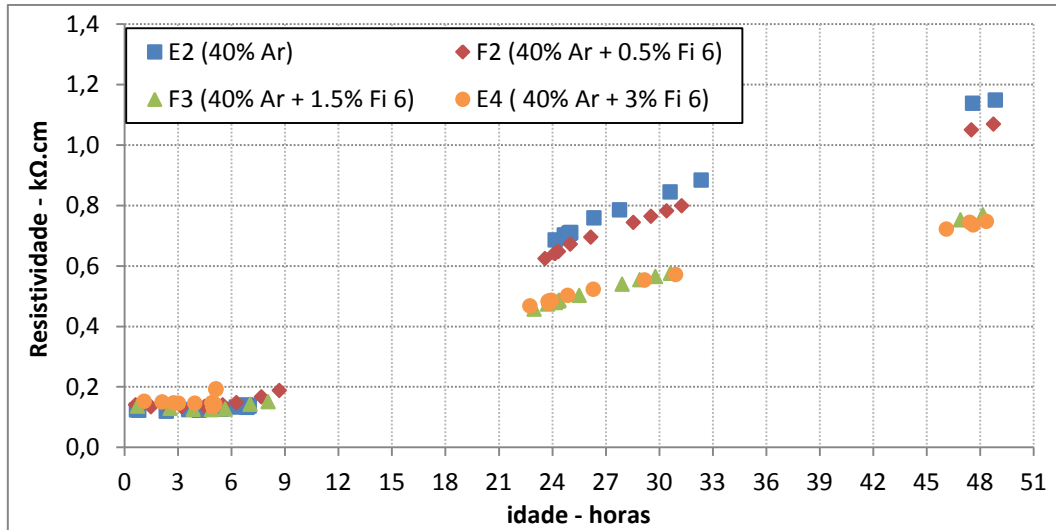


Figura 6.15 - Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes E2 (40% Ar), F2 (40% Ar + 0.5% Fi 6), F3 (40% Ar + 1.5% Fi 6) e E4 (40% Ar + 3% Fi 6).

A Figura 6.15 parece indicar que à medida que a concentração de fibras de aço vai sendo aumentada, os valores de resistividade vão diminuindo. Tal constatação deve-se ao facto de que ao adicionar-se à argamassa em estudo, materiais com boas propriedades elétricas, faz com que esta passe a apresentar uma menor resistência à condução elétrica. Às 24 horas de idade já é visível, uma diferença considerável entre os provetes E2 e F2, que não possuem fibras ou então uma quantidade muito baixa, e os provetes F3 e E4. Para a idade de 24 horas, regista-se uma diferença de cerca de 38% entre o F2 e E4. Para uma idade de 48 horas, essa diferença passa para cerca de 54%, pelo que há um aumento de 16% entre estas duas idades.

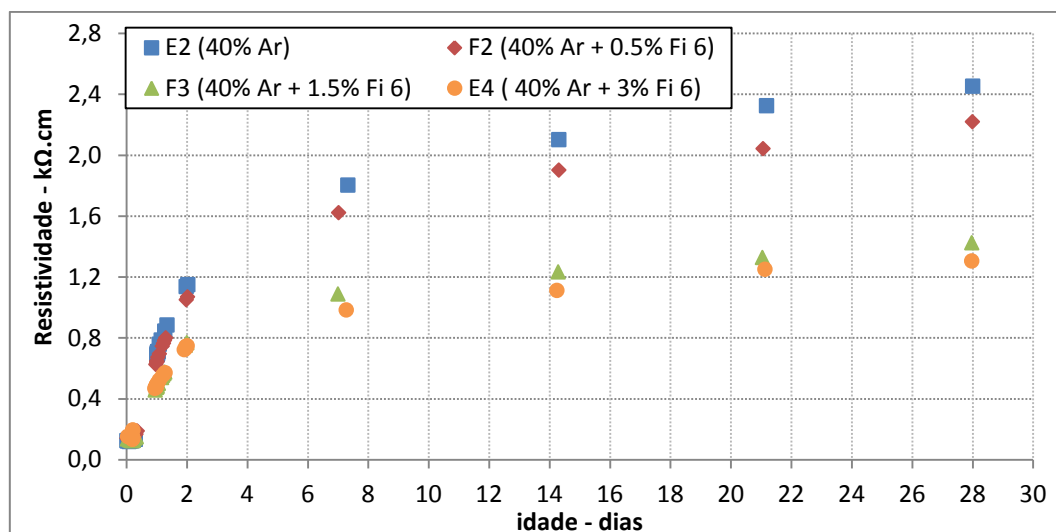


Figura 6.16 – Evolução da resistividade elétrica ao longo de 28 dias dos provetes E2 (40% Ar), F2 (40% Ar + 0.5% Fi 6), F3 (40% Ar + 1.5% Fi 6) e E4 (40% Ar + 3% Fi 6).

Na Figura 6.16, é possível visualizar-se que ao longo de 28 dias de idade a resistividade elétrica tende a aumentar e, à medida que se aumenta a concentração de fibras, o valor de resistividade tende a diminuir. A taxa de crescimento, entre as 48 horas e os 28 dias, é de 69, 107, 84 e 75% dos provetes E2, F2, F3 e E4, respetivamente. Quanto ao efeito da concentração de fibras na influência do valor de resistividade elétrica, às 48 horas, verifica-se que o valor de resistividade elétrica do E2 é 36% maior que F2, 88% maior que F3 e 93% maior que E4. Aos 28 dias o E2 é 10% maior que o F2, 73% que o F3 e 87% que o E4.

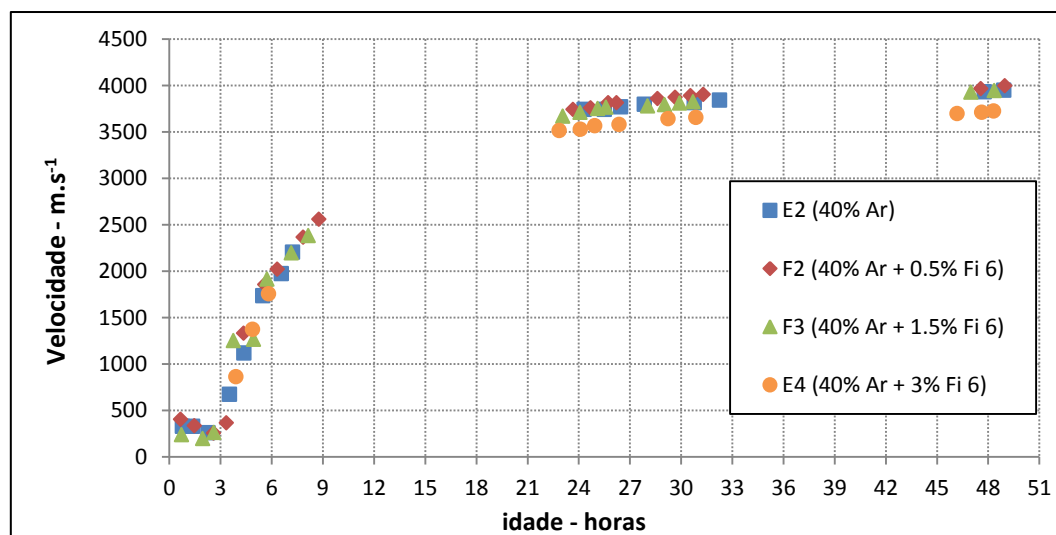


Figura 6.17 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons nas primeiras 48 horas dos provetes E2 (40% Ar), F2 (40% Ar + 0.5% Fi 6), F3 (40% Ar + 1.5% Fi 6) e E4 (40% Ar + 3% Fi 6).

Os resultados da Figura 6.17 mostram que para pequenas concentrações de fibras de aço, o método de ultrassons é pouco sensível para conseguir traduzir essas alterações, contudo, para

um valor de 3% de fibras de aço (provete E4), as velocidades de ultrassons registadas neste ensaio, começam a demarcar-se da tendência apresentada até então, passando a apresentar velocidade de propagação de ondas inferiores às anteriores. Sendo que às 48 horas, o valor de velocidade de ultrassons do provete E4 é 3626 m/s e do provete E2 é de 3950 m/s, pelo que existe uma diferença de cerca de 6% entre eles.

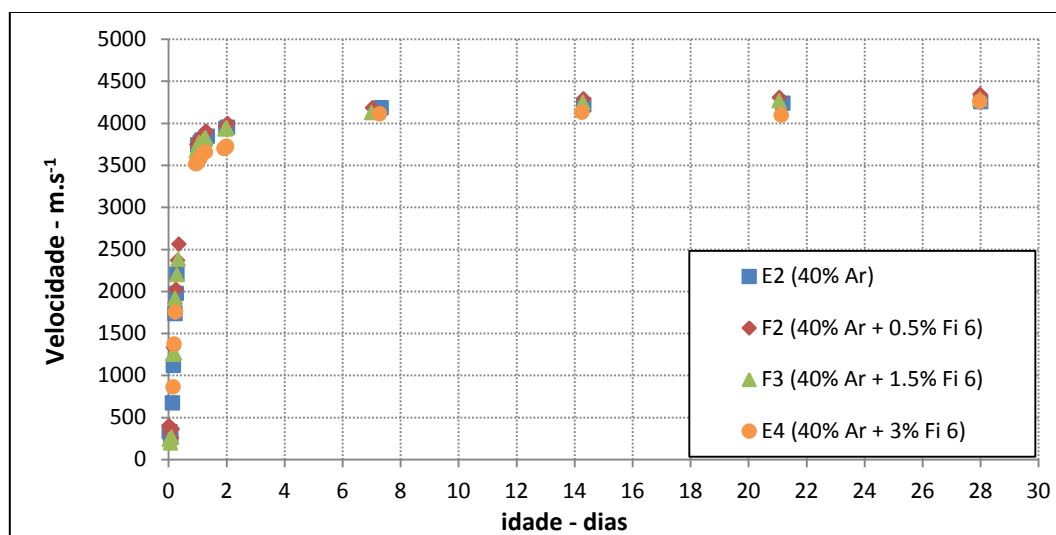


Figura 6.18 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons ao longo de 28 dias dos provetes E2 (40% Ar), F2 (40% Ar + 0.5% Fi 6), F3 (40% Ar + 1.5% Fi 6) e E4 (40% Ar + 3% Fi 6).

Da Figura 6.18, verifica-se que ao longo de 28 dias a evolução da velocidade de propagação de ultrassons tende a estabilizar num valor próximo dos 4300 m/s e apresenta um crescimento médio de 10% desde as primeiras 48 horas até aos 28 dias. Constata-se que, às 48 horas, a diferença do valor de velocidade de propagação de ultrassons, entre os vários provetes está entre 1% e 7% e, aos 28 dias, situa-se entre 0% e 2%. Pode-se concluir para estes provetes que, apesar de haver uma ligeira diferença nos respetivos valores às 48 horas, esta dilui-se para uma idade de 28 dias.

6.6. TIPO DE FIBRAS

Neste estudo paramétrico tenta-se perceber como é que o tipo de fibras pode influenciar o processo de hidratação do cimento nas primeiras idades.

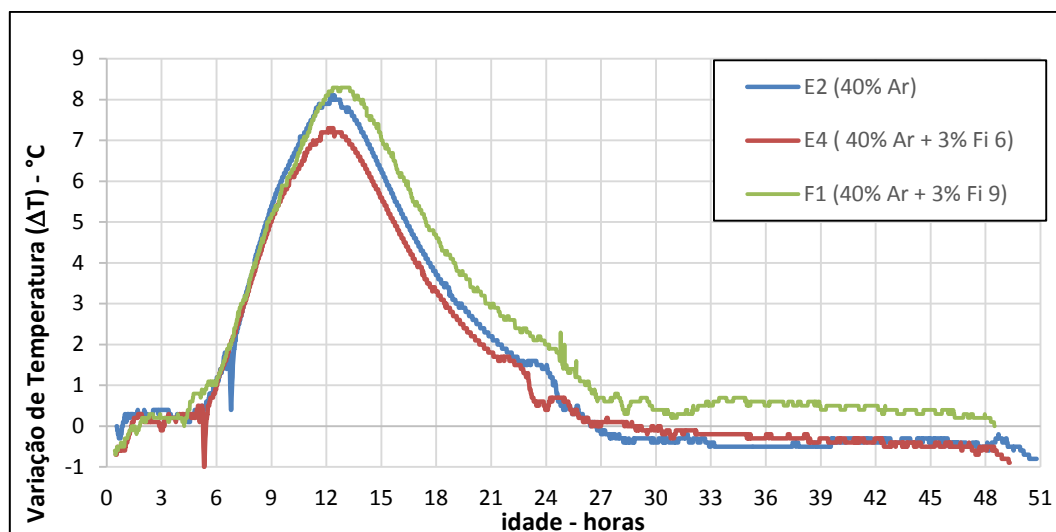


Figura 6.19 - Variação de Temperatura (ΔT) nas primeiras 48 h dos provetes E2 (40% Ar), E4 (40% Ar + 3% Fi 6) e F1 (40% Ar + 3% Fi 9).

Na Figura 6.19 foi retirado o efeito da presença da temperatura ambiente e representou-se apenas o desenvolvimento da temperatura provocada pela reação exotérmica da hidratação do cimento. Consta-se que para quantidades de fibras muito baixas, o efeito das fibras de aço parece provocar um ligeiro aumento no pico máximo de temperatura das argamassas e que a partir de determinada quantidade de fibras, terá um efeito oposto, resultando numa diminuição do pico de temperatura.

No Quadro 6.10 observa-se a idade e o valor de temperatura máxima que foi registada no processo de hidratação do cimento, durante as primeiras 48 horas em cada provete.

Quadro 6.10 - Valores de temperatura máxima e respetiva idade.

Provete	Temperatura máx. (°C)	ΔT (°C)	Idade (h)
E2 (40% Ar)	31,5	8,1	12,2
E4 (40% Ar + 3% Fi 6)	30,7	7,3	12,1
F1 (40% Ar + 3% Fi 9)	30,4	8,3	12,3

No Quadro 6.11 é possível visualizar os valores de resistividade elétrica (RE) e velocidade de propagação de ultrassons (UPV), registados às 48 horas e 28 dias de idade.

Quadro 6.11 – Resistividade elétrica e velocidade de propagação de ultrassons.

Provete	RE (k Ω .cm)		UPV (m.s ⁻¹)	
	48h	28 dias	48h	28 dias
E2 (40% Ar)	1,45	2,45	3949,30	4554,50

E4 (40% Ar + 3% Fi 6)	0,75	1,31	3726,00	4260,30
F1 (40% Ar + 3% Fi 9)	0,43	0,73	4117,80	4334,90

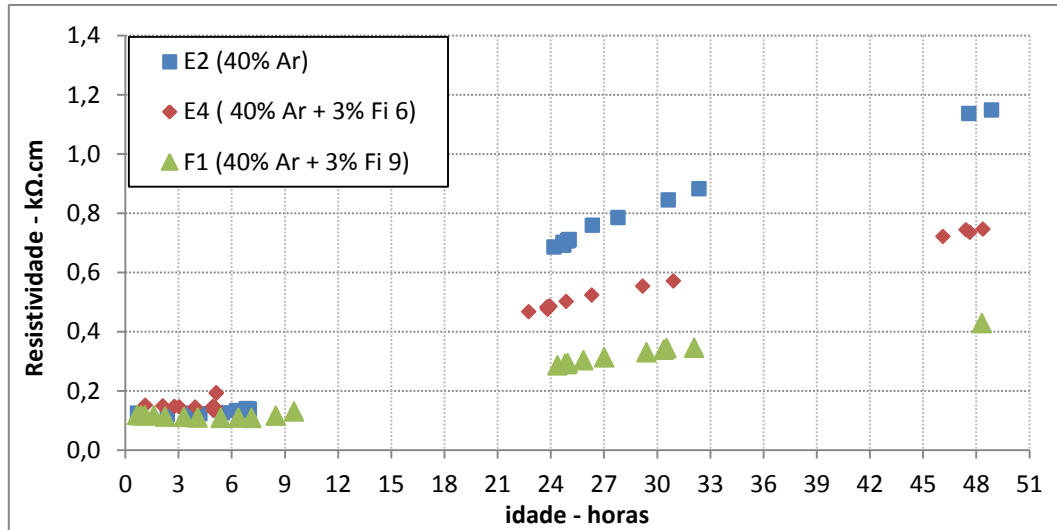


Figura 6.20 - Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes E2 (40% Ar), E4 (40% Ar + 3% Fi 6) e F1 (40% Ar + 3% Fi 9).

No que diz respeito ao desenvolvimento da resistividade, verifica-se, na Figura 6.20, que até às 9 horas de idade, os três provetes possuem valores de resistividade muito semelhantes. Para 24 horas de idade, verifica-se uma diferença de resistividade de 62% entre o provete F1 e E4 e 131% entre o provete F1 e E2. Às 48 horas, estas diferenças tendem a aumentar e constata-se uma diferença de resistividade de 74% entre o provete F1 e E4 e 237% entre o provete F1 e E2.

Conclui-se que à medida que se juntam fibras de maior comprimento, os valores de resistividade tendem a diminuir, uma vez que existe uma grande propensão de se criarem linhas condutoras de eletricidade.

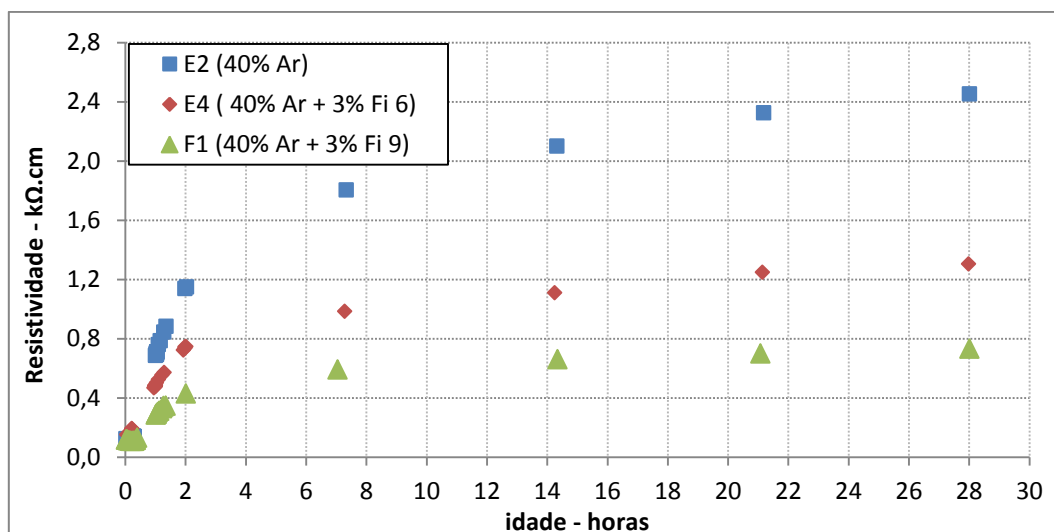


Figura 6.21 - Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes E2 (40% Ar), E4 (40% Ar + 3% Fi 6) e F1 (40% Ar + 3% Fi 9).

Da Figura 6.21, verifica-se que ao longo de 28 dias, o valor de resistividade elétrica vai aumentando a uma taxa de crescimento entre 69 e 75%. Às 48 horas, constata-se uma diferença no valor de resistividade elétrica de 74% entre o provete F1 e E4 e 237% entre o provete F1 e E2. Aos 28 dias, constata-se uma diferença no valor de resistividade elétrica de 79% entre o provete F1 e E4 e 236% entre o provete F1 e E2. Neste caso concreto, constata-se que, para as idades de 48 horas e 28 dias, a diferença de valores de resistividade elétrica entre os provetes, mantém-se constante.

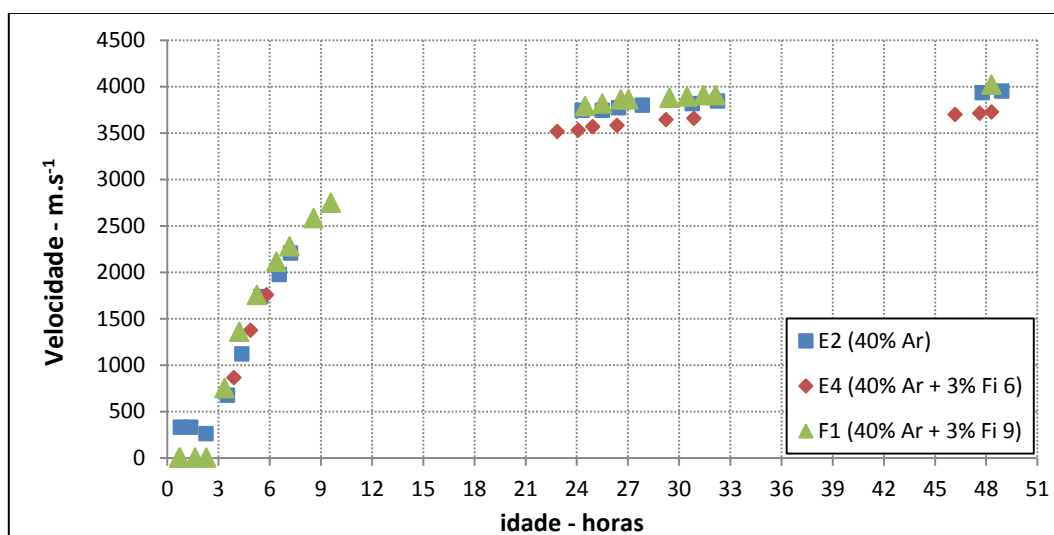


Figura 6.22 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons nas primeiras 48 horas dos provetes E2 (40% Ar), E4 (40% Ar + 3% Fi 6) e F1 (40% Ar + 3% Fi 9).

Na Figura 6.22 verifica-se que até às 9 horas de idade os valores de velocidade de propagação de ultrassons, são praticamente semelhantes. No entanto, a partir das 24 horas esses valores

começam a divergir e verifica-se uma diferença de velocidade de ultrassons de 6% entre o provete E2 e E4, assim como para as 48 horas.

Conclui-se que a presença de diferentes comprimentos de fibras de aço, parecem não influenciar a evolução da velocidade de propagação de ultrassons. Apesar de se notar que a presença de fibras de 6 mm (que existem em maior quantidade que as de 9 mm, pois possuem um comprimento mais reduzido) parecem provocar uma diminuição da velocidade de propagação de ultrassons.

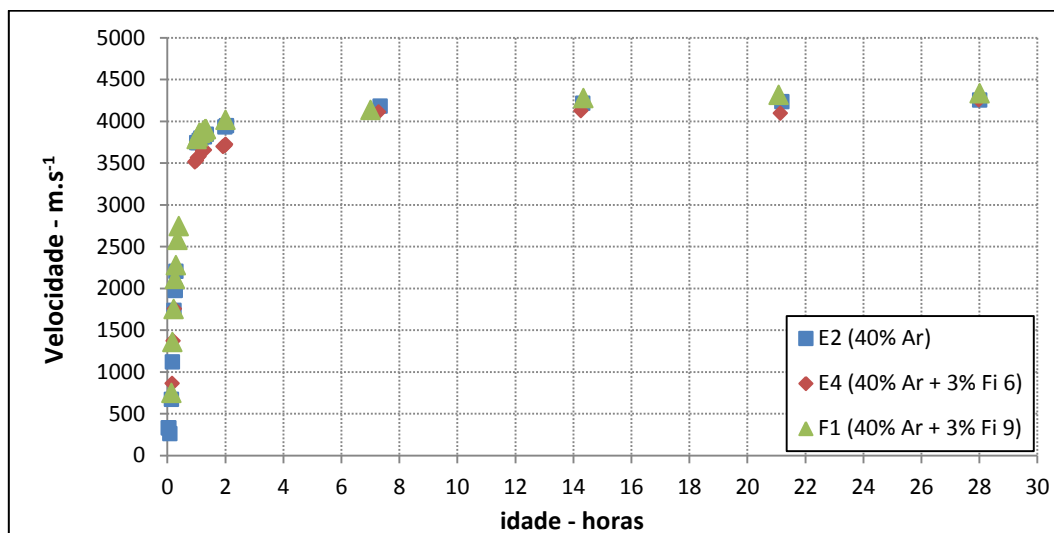


Figura 6.23 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons ao longo de 28 dias dos provetes E2 (40% Ar), E4 (40% Ar + 3% Fi 6) e F1 (40% Ar + 3% Fi 9).

Na Figura 6.23 é possível constatar que até às 48 horas o crescimento da velocidade de propagação de ultrassons é muito acentuado e, a partir desse momento, tende a estabilizar. Constata-se que a taxa de crescimento média é de 10% desde as 48 horas até aos 28 dias. Às 48 h, a diferença nos valores de velocidade de propagação de ultrassons varia entre 2 e 8% entre os vários provetes e, aos 28 dias, varia entre 0 e 2%. Pelo que aos 28 dias, a presença das fibras não se faz sentir nos valores registados de velocidade de propagação de ultrassons.

6.7. COMPARAÇÃO COM ARGAMASSA PROJETO

Apesar de, não se tratar de um estudo paramétrico, houve a curiosidade de verificar o comportamento do molde instrumentado no estudo de um betão. Assim, neste subcapítulo tenta-se analisar a evolução da hidratação de um betão auto-compactável do projeto Betofibra, designada por F4 (Argamassa Projeto). Esta contém na sua constituição 40% de areia e 3% de fibras de aço (9 e 12 mm de comprimento), concentrações iguais a outras já estudadas.

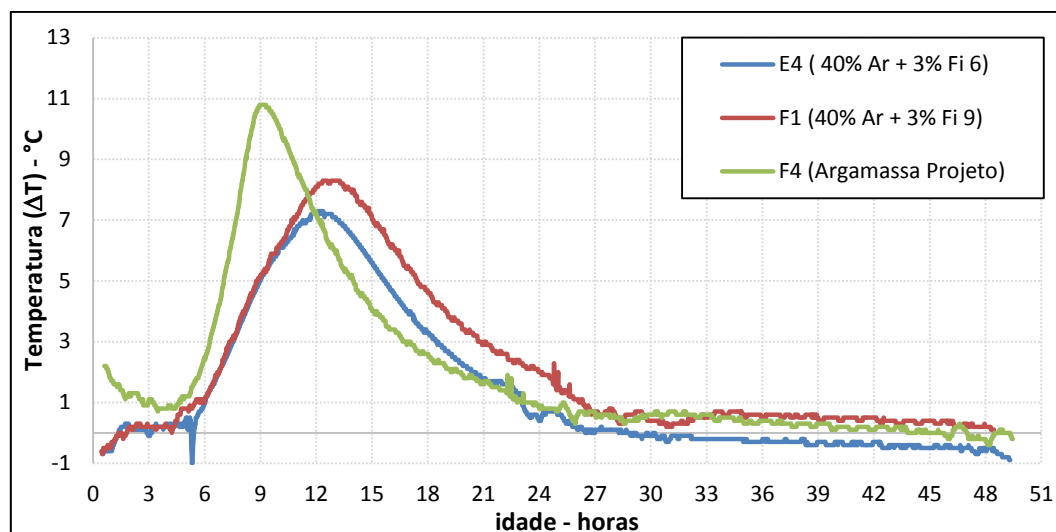


Figura 6.24 - Diferença de Temperatura (ΔT) nas primeiras 48 h dos provetes F4 (Argamassa Projeto), E4 (40% Ar + 3% Fi 6) e F1 (40% Ar + 3% Fi 9).

Da evolução das curvas de temperatura (Figura 6.24), constata-se que a argamassa projeto tem um comportamento distinto das outras amassaduras estudadas. Na idade compreendida entre os primeiros minutos e as primeiras 4 horas, o provete argamassa projeto apresenta uma diminuição de temperatura, enquanto que os outros provetes, para o mesmo período de tempo, apresentam uma tendência para aumentar de temperatura ou mantê-la. Além disso, possuiu um pico de temperatura mais elevado que os outros dois provetes, com a mesma concentração de areia e fibras de aço, mas que não possuem sílica de fumo na sua constituição, sendo esta a causa deste comportamento distinto.

No Quadro 6.12 observa-se a idade e o valor de temperatura máxima que foi registada no processo de hidratação do cimento, durante as primeiras 48 horas em cada provete.

Quadro 6.12 - Valores de temperatura máxima e respetiva idade.

Proвете	Temperatura máx. (°C)	ΔT (°C)	Idade (h)
E4 (40% Ar + 3% Fi 6)	30,7	7,3	12,1
F1 (40% Ar + 3 % Fi 9)	30,4	8,3	12,3
F4 (Argamassa Projeto)	32,9	10,8	8,9

No Quadro 6.13 é possível visualizar os valores de resistividade elétrica (RE) e velocidade de propagação de ultrassons (UPV), registados às 48 horas e 28 dias de idade.

Quadro 6.13 – Resistividade elétrica e velocidade de propagação de ultrassons.

Provete	RE (k Ω .cm)		UPV (m.s ⁻¹)	
	48h	28 dias	48h	28 dias
E4 (40% Ar + 3% Fi 6)	0,75	1,31	3726,00	4260,30
F1 (40% Ar + 3% Fi 9)	0,43	0,73	4117,80	4334,90
F4 (Argamassa Projeto)	0,68	4,86	4111,10	4970,10

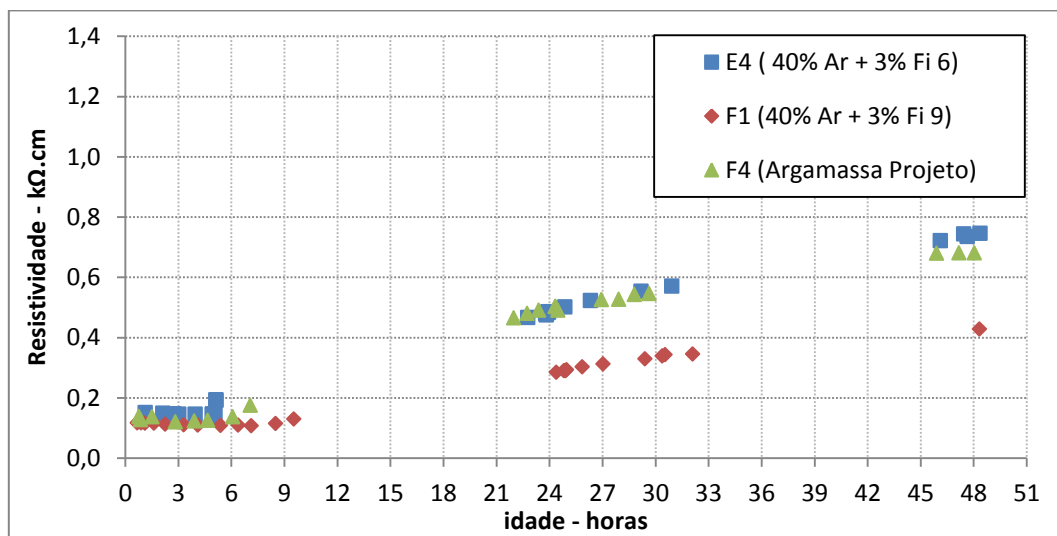


Figura 6.25 - Evolução da resistividade elétrica nas primeiras 48 h dos provetes E4 (40% Ar + 3% Fi 6), F1 (40% Ar + 3% Fi 9) e F4 (Argamassa Projeto).

Da avaliação da Figura 6.25, ao comparar os valores de resistividade do provete da argamassa projeto (que tem na sua constituição 3% de fibras de 9 e 12 mm) com os valores dos outros provetes com a mesma concentração de areias e fibras (de 6 e 9) constata-se que o provete F4 (argamassa projeto) apresenta valores de resistividade inferiores ao provete E4 e superiores ao F1, não existindo assim uma clara tendência para se poderem tirar conclusões definitivas.

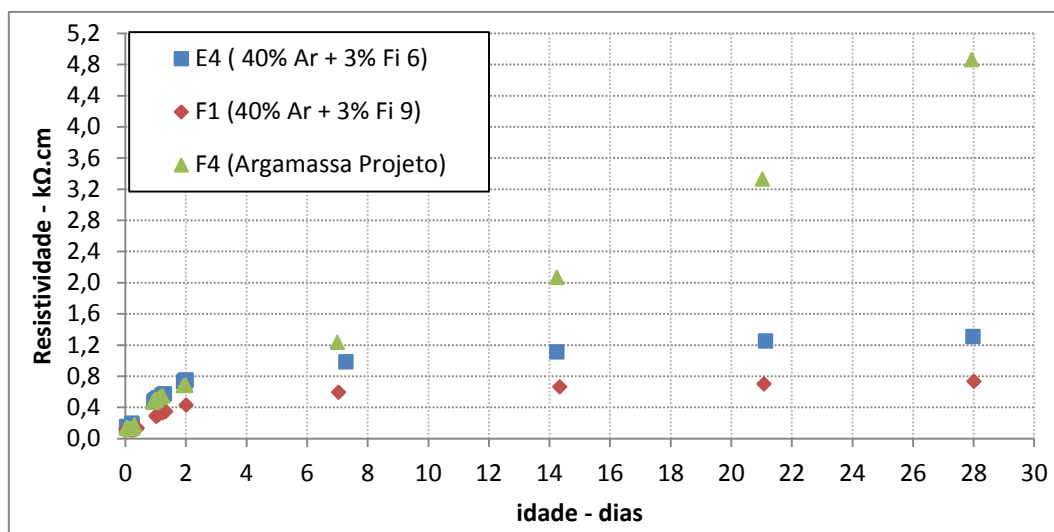


Figura 6.26 - Evolução da resistividade ao longo de 28 dias dos provetes E4 (40% Ar + 3% Fi 6), F1 (40% Ar + 3% Fi 9) e F4 (Argamassa Projeto).

Da análise da Figura 6.26 verifica-se ao longo de 28 dias, que a resistividade tende a aumentar.

Contudo, a argamassa projeto apresenta um crescimento e um valor completamente distinto dos dois outros provetes. Enquanto que a taxa de crescimento do valor de resistividade elétrica do F4, entre as 48 horas e os 28 dias é de 615%, a taxa de crescimento do E4 e F1 é de 75 e 69%, respectivamente. Às 48 horas o provete F4 apresenta uma resistividade elétrica 10% maior que o E4 e 58% maior que o F1. Aos 28 dias, Esta diferença dispara, sendo o valor de resistividade elétrica do F4 maior 271% que o E4 e 566% maior que o F1.

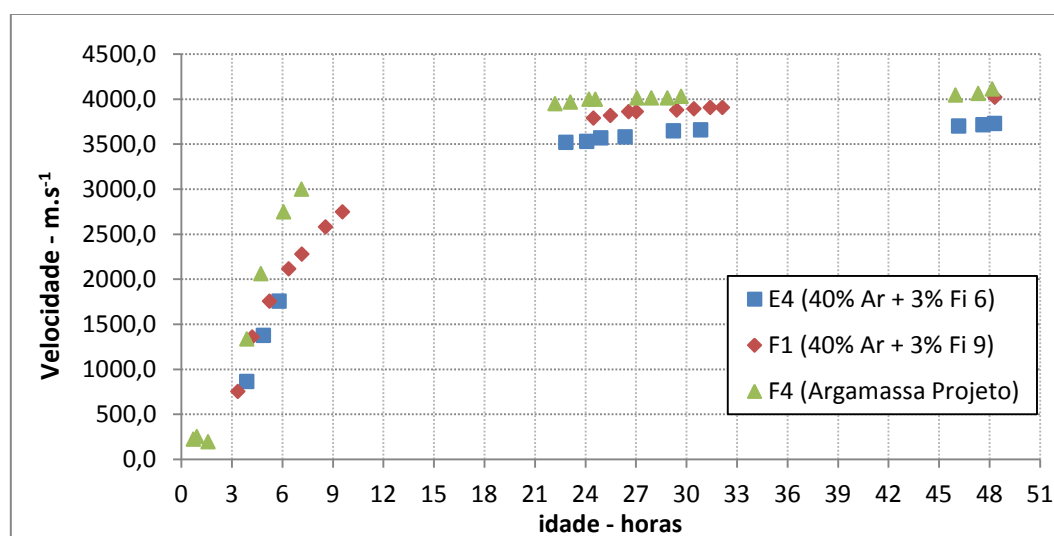


Figura 6.27 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons nas primeiras 48 horas dos provetes E4 (40% Ar + 3% Fi 6), F1 (40% Ar + 3% Fi 9) e F4 (Argamassa Projeto).

Da análise da Figura 6.27, os resultados parecem indicar que para a argamassa projeto a velocidade de propagação de ultrassons tem um desenvolvimento mais acelerado quando comparada com as outras, e conseguem registar-se valores mais cedo. Isto sucede devido ao facto de esta conter sílica de fumo e muito baixa razão água/cimento, o que provoca uma aceleração no processo de hidratação, fazendo com que a estrutura da pasta cimentícia solidifique mais rápido e, como consequência, as ondas de ultrassons conseguem propagar-se mais rápido. Este resultado encontra-se em concordância no estudo levado a cabo por Zhang, Y. et al [10], que concluíram que a adição de sílica de fumo acelera consideravelmente o processo de hidratação.

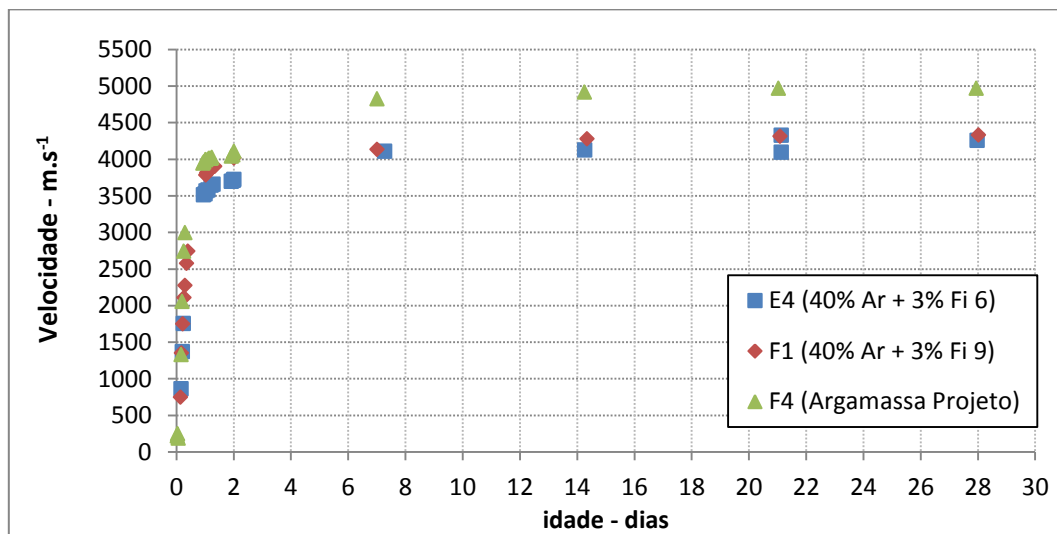


Figura 6.28 - Evolução da velocidade de propagação de onda de ultrassons ao longo de 28 dias dos provetes E4 (40% Ar + 3% Fi 6), F1 (40% Ar + 3% Fi 9) e F4 (Argamassa Projeto).

Na Figura 6.28, constata-se que a velocidade de propagação de ultrassons tende a aumentar ao longo dos 28 dias. Verifica-se, no entanto, que a taxa de crescimento da velocidade de ultrassons do F4 é 21% e os outros dois provetes variam apenas entre 8 e 14%. Às 48 horas, a velocidade de propagação de ultrassons do F4 é de 10% maior que o E4 e 2% maior que F1, enquanto que aos 28 dias a velocidade de ultrassons do F4 é 17% maior que o E4 e 15% que o F1.

7

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

7.1. CONCLUSÕES

O principal objetivo desta tese de mestrado integrado passava pela construção e utilização de um molde instrumentado com capacidade de avaliar a evolução da temperatura, resistividade e ultrassons na hidratação do cimento em pastas e argamassas nas primeiras 48 horas. Com a construção e utilização funcional do molde HC2, o objetivo principal desta tese foi cumprido.

Um segundo objetivo passava pela realização de vários estudos paramétricos e tentar perceber qual o efeito que cada parâmetro teria na evolução da hidratação do cimento ao longo das primeiras 48 horas. Com a conceção dos moldes instrumentados HC2, A, B e C esse objetivo tornou-se exequível em tempo útil e concretizou-se, assim, o segundo objetivo desta tese.

Os resultados obtidos pela série de moldes referidos, permitiram obter valores experimentais que seguem a mesma tendência dos resultados apresentados nos trabalhos desenvolvidos por outros autores.

Em relação aos resultados obtidos nos vários estudos paramétricos, podemos tirar as seguintes conclusões em relação ao efeito provocado na temperatura:

- Com o aumento a relação água/cimento o início do aumento acentuado da temperatura é cada vez mais tardio e o valor de pico de temperatura é cada vez mais baixo;
- O facto de se adicionar areia faz com que a temperatura máxima atingida seja significativamente mais baixa e á medida que se aumenta a sua concentração, faz com que a temperatura máxima continue a diminuir;
- Com base nos resultados obtidos no estudo experimental para analisar o efeito que as fibras de aço provocam na evolução da temperatura de hidratação do cimento, leva-nos a concluir que a quantidade de ensaios realizados é insuficiente para retirar ilações conclusivas, no entanto, os resultados parecem indicar que para uma determinada quantidade de fibras, a sua presença pode aumentar o valor máximo de temperatura atingido quando comparado com a mesma composição sem fibras. E que a partir de determinada quantidade de fibras, quanto maior for a sua quantidade, menor será o valor máximo de temperatura atingido;

Em suma, para concentrações de areia e razões de água/cimento mais baixas, obtêm-se valores de temperatura mais elevados. Quanto às fibras de aço, os resultados não são conclusivos.

Em relação à resistividade, e com base nos estudos paramétricos, podemos concluir que:

- À medida que se aumenta a razão água-cimento a resistividade diminui;
- À medida que se aumenta a concentração de areia a resistividade aumenta;
- Os resultados parecem indicar que com o aumento da concentração de fibras existe uma tendência para a resistividade diminuir;
- Quando, para a mesma percentagem de fibras, se faz variar o seu comprimento não existe uma tendência clara da evolução dos resultados. Levando a crer que na quantidade de fibras vs comprimento da fibra, não existe dominância de uma em relação à outra.

Em suma, para razões água-cimento mais elevadas e concentração de areia mais baixa a resistividade diminui. Quanto às fibras, os resultados não são suficientemente conclusivos.

Na avaliação da evolução dos ultrassons podemos concluir:

- Os resultados parecem indicar que à medida que a razão água/cimento aumenta a velocidade de propagação de ultrassons diminui, no entanto, se houver deposição de finos da pasta de cimento, parece haver um aumento da velocidade de ultrassons, contrariando a tendência apresentada nos outros valores;
- À medida que aumenta a concentração de areias, a velocidade de propagação de ultrassons aumenta;
- Os resultados parecem indicar que, para fibras do mesmo tamanho até determinada concentração, a velocidade de propagação de ultrassons tende a manter-se semelhante à da pasta sem adição de fibras. A partir de determinada concentração a velocidade de ultrassons diminui, no entanto, as ilações não são conclusivas devido à escassez de resultados.
- Os resultados levam-nos a concluir que quanto maior o comprimento da fibra de aço maior a velocidade de propagação de ultrassons.

Em suma, à medida que se aumenta o comprimento da fibra de aço e a concentração de areias a velocidade de ultrassons aumenta. Aparentemente, razões de água/cimento mais baixas, também resultam em velocidades de propagação de ultrassons mais elevadas.

Em relação à argamassa projeto por se tratar de um betão auto-compactável com características bastantes diferentes das demais, não nos permite tirar conclusões comparativas com as outras pastas e argamassas ensaiadas, ficando os resultados obtidos disponíveis para futuros estudos desse material.

7.2. LIÇÕES APRENDIDAS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Ao longo deste estudo experimental algumas questões ficaram por esclarecer e outras questões foram surgindo, o que leva a necessidade de aprofundar certos aspetos relativos aos ensaios desenvolvidos. Deste modo, propõem-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Automatizar a medição de ultrassons e de resistividade de forma contínua;
- Iniciar a medição de temperatura, resistividade e ultrassons logo após o momento de fabricação da amassadura em estudo;
- Efetuar um maior número de ensaios de maneira a dar resposta à insuficiência de resultados apresentados neste estudo, e desta forma, perceber os limites a partir dos quais se pode tirar conclusões definitivas sobre o parâmetro em estudo.

- Desenvolver um novo molde instrumentado, a partir do qual se possam avaliar mais grandezas, como por exemplo, perda de massa.
- Realizar provetes com dimensões padronizadas e ensaios complementares por forma a complementar a informação obtida pelo atual sensor.
- Fazer a modelação numérica do comportamento térmico semi-adiabático do conjunto material e molde, de forma a isolar as propriedades de libertação de calor da pasta de cimento.
- Efectuar ensaios destrutivos de resistência à tração indireta por flexão e compressão em provetes cúbicos, com 100 mm de aresta, aos 2, 7, 14, 21 e 28 dias de idade.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Vieira, M. Betão. in *Ciências e Engenharia de Materiais de Construção*, pp. 211-271, M. Clara Gonçalves and Fernanda Margarido, Lisboa, 2012.
- [2] Coutinho, J. S. *Ciências de Materiais - Ligantes e agregados*. FEUP, Porto, 2002.
- [3] Teixeira, A. C. and Martins, J. G. *Betões de elevado Desempenho*. Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2003.
- [4] Martins, J. G. and Oliveira, N. *Betões - Elementos Gerais, Natureza e Qualidade*. Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2005.
- [5] Martins, J. G. and Ribeiro, C. *Betões - Adjuvantes*. Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2003.
- [6] Costa, C. Ligantes Hidráulicos in *Ciências e Engenharia de Materiais de Construção*, pp. 1-61, M. Clara Gonçalves and Fernanda Margarido, Lisboa, 2012.
- [7] Silva, L. M. G. *Caracterização das Propriedades Termo-Dinâmicas do Betão nas primeiras Idades para Aplicação Estrutural*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2007.
- [8] Ferreira, D. C. S. *Identificação e Modelação do Comportamento de Estruturas de Betão nas Primeiras Idades*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009.
- [9] Barluenga, G., Puente, J., and Palomar, I. *Monitorización a edades tempranas, microestructura y comportamiento endurecido de HAC con combinación de filler y adiciones minerales*. 3º Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante Avances y oportunidades, 3 y 4 de Diciembre de 2012, Madrid, pp. 173-182, Madrid.
- [10] Zhang, Y., Zhang, W., She, W., Ma, L., and Zhu, W. *Ultrasound monitoring of setting and hardening process of ultra-high performance cementitious materials*. NDT & E International, 25 October 2009, pp. 177-184, .
- [11] Lauer, K. R. Magnetic/Eletrical Methods. in *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, pp. 10-9 - 10-20, V. M. Malhotra and N. J. Carino, United States of America, 2004.
- [12] Silva, P. C. F. *Resistividade elétrica e o controlo de qualidade de betão*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2011.
- [13] Bungey, J. H., Millard, S. G., and Grantham, M. G. Durability tests. in *Testing of Concrete in Structures*, pp. 191, Taylor & Francis e-Library, New York, 2006.
- [14] <http://www.iag.usp.br/siae98/eletromag/eletrica.gif>. 17-06-2013.
- [15] Carino, N. J. Method to Evaluate Corrosion of Reinforcement. in *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, pp. 11-1 - 11-24, V. M. Malhotra and N. J. Carino, United States of America, 2004.
- [16] Silva, P. C., Ferreira, R. M., and Figueiras, H. *Medições de resistividade elétrica avaliada em provetes de betão: influência do método de ensaio e das condições de cura*. Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012, 24-26 de outubro de 2012, FEUP, pp. Artigo 124, Porto.
- [17] Silva, B. J. M. *Estruturas Inteligentes Utilizando Betão e Polímero Reforçado com Fibras de Carbono*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2005.

- [18] Hughes, B. P., Soleit, A. K. O., and Brierley, R. W. *New technique for determining the electrical resistivity of concrete*. Magazine of Concrete Research: Vol.37, No.133, December 1985, pp. 243-248, .
- [19] NP EN 12504-4 2007: Ensaaios do betão nas estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons.
- [20] Naik, T. R., Malhotra, V. M., and Popovics, J. S. The Ultrasonic Pulse Velocity Method. in *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, pp. 8-1 - 8-14, V. M. Malhotra and N. J. Carino, United States of America, 2004.
- [21] http://www.jroma.pt/PDFS/catalogo_proceq.pdf. 23-06-2013.
- [22] Coutinho, A. S. Resistência às Tensões. in *Fabrico e Propriedades do Betão, Volume III*, pp. 1-106, LNEC, Lisboa, 1997.
- [23] Vieira, J. P. *Interação Cimento-Superplastificante - Avaliação da estabilidade do comportamento*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade técnica de Lisboa, 2010.
- [24] NP EN 12350-8:2010. «Ensaaios do betão fresco. Parte 8: Betão autocompactável – Ensaio de espalhamento» «Ensaaios do betão fresco. Parte 8: Betão autocompactável – Ensaio de espalhamento».
- [25] Ribeiro, F. J. T. *Betão de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [26] NP EN 196-3 2006 Parte 3 Determinação do tempo de presa e da expansibilidade. IPQ.
- [27] <http://www.mc-bauchemie.de/en/~media/Files/MC-Bauchemie/Products/en/Technical%20Datasheet/Centrilit%20Fume%20SX.ashx>. 24-06-2014.
- [28] http://www.construlink.com/LogosCatalogos/sika_adjuvantes_betao_sika_viscocrete_3006_ed2008_2009.pdf?random=2141297632. 34-06-2013.
- [29] NP EN 933-1: 2000. «Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica».
- [30] NP EN 196-1 "Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas."

ANEXOS

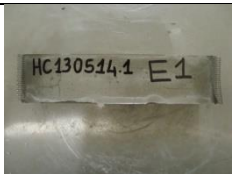
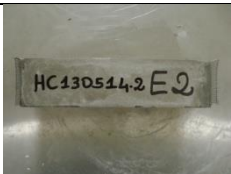
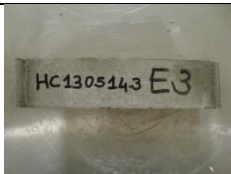

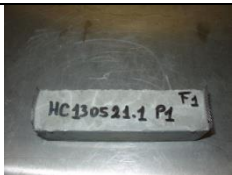







ANEXO A – PROVETES CÚBICOS E PRISMÁTICOS

Neste anexo apresentam-se os provetes cúbicos e prismáticos utilizados ao longo deste estudo experimental.

Provetes Cúbicos

A1	A2	-	-
		-	-
B1	B2	B3	-
			-
C1	C2	C3	C4
			
D1 (w/c 0.40)	D2 (w/c 0.60)	D3 (w/c 0.67)	-
			-
E1 (Ref.)	E2 (40%areia)	E3 (50% areia)	E4 (40% Ar + 3% Fi6)
			
F1 (40% Ar + 3% Fi9)	F2 (40%Ar + 0.5% Fi6)	F3 (40%Ar + 1.5% Fi6)	F4 (Argamassa Projeto)
			
G1 (w/c 0.40)	G2 (w/c 0.60)	G3 (w/c 0.67)	G4 (w/c 0.80)
			

Provetes Prismáticos

E1 P1 (Ref.)	E2 P1 (40% Ar)	E3 P1 (50% Ar)	E4 P1 (40% Ar + 3% Fi6)
			
F1 P1 (40% Ar + 3% Fi9)	F2 P1 (40%Ar + 0.5% Fi6)	F3 P1 (40%Ar + 1.5% Fi6)	F4 P1 (Argamassa Projeto)
			
F1 P2 (40% Ar + 3% Fi9)	F2 P2 (40%Ar + 0.5% Fi6)	F3 P2 (40%Ar + 1.5% Fi6)	F4 P2 (Argamassa Projeto)
			
G1 P1 (w/c 0.40)	G2 P1 (w/c 0.60)	G3 P1 (w/c 0.67)	G4 P1 (w/c 0.80)
